



การศึกษาการกระจายตัวของเฟส
ในพื้นที่ขนาดเล็กสำหรับการก่อรูปลำดับชั้นแบบกระจาย

โดย
นายอานนท์ ไชยธรรมมาตร B5207008

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427494 โครงการศึกษาวិชาการกรมโทรคมนาคม
และวิชา 427499 โครงการนิสิตกรมโทรคมนาคม
หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2546
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ประจำภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2556

การศึกษาการกระจายตัวของเฟสในพื้นที่ขนาดเล็กสำหรับการ
ก่อรูปตำคตินแบบกระจาย

คณะกรรมการสอบโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ ภาอุฑารสกุล)
กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุติมา พรหมมาก)
กรรมการ



(อาจารย์ธนเสกฐ์ ทศศิกรพัฒน์)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำรายงานโครงการฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม รายวิชา 427494 โครงการศึกษา
วิศวกรรมโทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2556

โครงการ	โครงการการศึกษาการกระจายตัวของเฟส ในพื้นที่ขนาดเล็กสำหรับการก่อรูปลากลื่นแบบกระจาย
ผู้จัดทำโครงการ	นายอานนท์ ไชยธรรมมาตร B5207008
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุฑารศกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
ภาคการศึกษาที่	1/2556

บทคัดย่อ

จากที่เครือข่ายไร้สายมีจุดด้อยที่มีระยะทางการสื่อสารที่จำกัด ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคนิคที่สามารถเพิ่มระยะทางการสื่อสารไร้สายได้ ซึ่งการก่อรูปลากลื่นที่มีพหุหลักหันไปยังทิศทางที่ต้องการเป็นหนึ่งในวิธีที่สามารถเพิ่มระยะการสื่อสาร โดยการก่อรูปลากลื่นแบบหันพหุหลักได้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ การก่อรูปลากลื่นด้วยตัวเอง และการก่อรูปลากลื่นแบบกระจาย ซึ่งการก่อรูปลากลื่นด้วยตัวเองจำเป็นต้องอาศัยสายอากาศแถวลำดับที่มีตำแหน่งของสายอากาศที่แน่นอนในการก่อรูปลากลื่น ดังนั้นการก่อรูปลากลื่นด้วยตัวเองจึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปติดตั้งบนโนดที่มีขนาดเล็กที่ต้องการความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ เช่น โทรศัพท์มือถือหรือคอมพิวเตอร์แบบพกพา ขณะที่การก่อรูปลากลื่นแบบกระจายจะมีข้อดีกว่าเนื่องจากไม่จำเป็นต้องติดตั้งสายอากาศแถวลำดับ โดยจะอาศัยความร่วมมือจากลูกข่ายหรือโนดอื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียงมาช่วยก่อรูปลากลื่น โดยแต่ละโนดจะส่งสัญญาณข้อมูลเดียวกัน พร้อมๆกัน และสำคัญคือต้องปรับเฟสของสัญญาณที่เดินทางไปถึงปลายทางให้เท่ากัน ซึ่งในความเป็นจริงเราไม่ทราบถึงตำแหน่งที่แน่นอนของโนด จึงจำเป็นต้องทำการซิงโครไนซ์เฟสคือ สัญญาณของแต่ละโนดจะต้องไม่หักล้างกันเอง เมื่อรวมสัญญาณกันที่สถานีฐาน ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของเฟสในพื้นที่ขนาดเล็กสำหรับการก่อรูปลากลื่นแบบกระจาย เพื่อนำข้อมูลการกระจายตัวของเฟสที่ได้มาวิเคราะห์ผลกระทบของการก่อรูปลากลื่นแบบกระจายและจากผลการทดลองที่ได้เราพบว่า ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าน้อยมาก สามารถที่จะนำกระบวนการนี้ไปใช้ในพื้นที่ขนาดเล็กนี้ได้ต่อไป

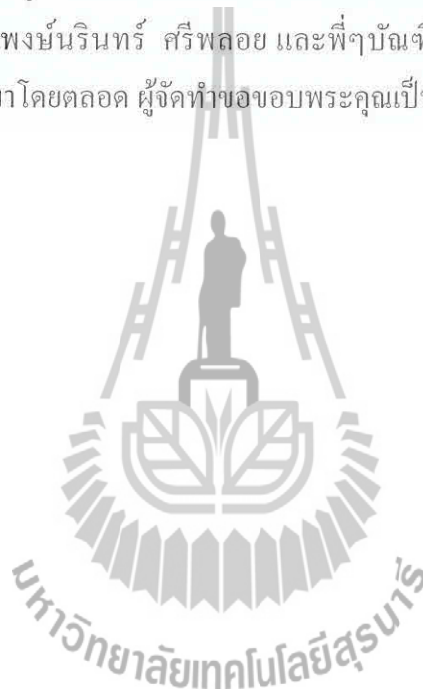
กิตติกรรมประกาศ

จากการที่ผู้จัดทำรายงานได้รับมอบหมายให้จัดทำโครงการเรื่องการศึกษาการกระจายตัวของเฟสในพื้นที่ขนาดเล็กสำหรับการก่อรูปลำดับชั้นแบบกระจายส่งผลให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง จากบุคคลต่างๆดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจผู้จัดทำโครงการมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขโครงการเล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณพงษ์นรินทร์ ศรีพลอย และพี่ๆบัณฑิตที่คอยให้ความช่วยเหลือ คอยให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ มาโดยตลอด ผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

อานนท์ ไชยตระมาตร



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
กิตติกรรมประกาศ.....	ข
สารบัญ.....	ค
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ปัญหาและที่มาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ.....	2
2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 กล่าวนำ.....	3
2.2 สายอากาศแฉวลำดับ.....	3
2.2.1 สายอากาศแฉวลำดับแบบเส้น.....	4
2.2.2 สายอากาศแฉวลำดับระนาบ.....	6
2.2.3 สายอากาศแฉวลำดับวงกลม.....	9
2.3 การก่อรูปลำคลื่น.....	12
2.3.1 การก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเอง.....	13
2.3.2 การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย.....	15
2.3.2.1 แบบจำลองการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย.....	17
2.4 การชิงโครโมสเฟสแบบวงรอบปิดโดยอาศัยการป้อนกลับสัญญาณ 1 บิต.....	22
2.5 กล่าวสรุป.....	29
3 วิธีการดำเนินการทำโครงการ.....	30
3.1 กล่าวนำ.....	30
3.2 การออกแบบการวัด.....	30
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำลอง.....	31
3.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์.....	32
3.5 การวัด.....	32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	33
4.1	กล่าวนำ.....	33
4.2	ผลการวัดครั้งที่ 1	33
4.3	ผลการวัดครั้งที่ 2	40
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	51
5.1	บทสรุป.....	51
5.2	สิ่งที่ได้จากการศึกษาโครงการ.....	51
5.3	ปัญหาและอุปสรรค	51
5.4	ข้อจำกัดของโครงการ.....	51
5.5	ข้อเสนอแนะ	51
	รายการอ้างอิง.....	52
	ประวัติผู้เขียน.....	54



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาและที่มาของโครงการ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านการสื่อสารไร้สายได้มีบทบาทเข้ามาในชีวิตประจำวันของเราเป็นอย่างมากไม่ว่าจะใช้เพื่อการติดต่อสื่อสารหรือใช้เพื่อความบันเทิง เนื่องจากการสื่อสารไร้สายมีจุดเด่นที่สามารถรับส่งข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและสะดวกสบายเนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้สายส่งสัญญาณในการรับส่งข้อมูล แต่การสื่อสารไร้สายมีจุดด้อยที่มีขอบเขตการส่งข้อมูลที่จำกัดเนื่องจากสัญญาณที่ถูกส่งออกไปในอากาศจะถูกกลดทอนลงไปตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาเทคนิคที่สามารถเพิ่มระยะทางการสื่อสารไร้สายให้กับโนด ซึ่งการก่อรูปลำคลื่นแบบหันพู่หลักได้เป็นหนึ่งวิธีที่สามารถเพิ่มระยะการสื่อสาร โดยการก่อรูปลำคลื่นแบบหันพู่หลักได้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ 1) การก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเอง หรือการก่อรูปลำคลื่นโดยใช้สายอากาศแถวลำดับ และ 2) การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย หรือการก่อรูปลำคลื่นด้วยการอาศัยความร่วมมือจากโนดอื่น

ด้วยเหตุที่การก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเองจำเป็นต้องอาศัยสายอากาศแถวลำดับที่มีตำแหน่งของสายอากาศที่แน่นอนในการก่อรูปลำคลื่น ดังนั้นการก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเองจึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปติดตั้งบนโนดที่มีขนาดเล็กที่ต้องการความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ เช่น โทรศัพท์มือถือหรือคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Laptop) ขณะที่การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายจะมีข้อดีกว่าเนื่องจากไม่จำเป็นต้องติดตั้งสายอากาศแถวลำดับ โดยจะอาศัยความร่วมมือจากลูกข่ายหรือโนดอื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียงมาช่วยก่อรูปลำคลื่น โดยโนดแต่ละโนดต้องการสายอากาศเพียงต้นเดียวในการก่อรูปลำคลื่น แต่การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายในความเป็นจริงเราไม่ทราบถึงตำแหน่งที่แน่นอนของโนดเนื่องจากตำแหน่งของโนดมีการกระจายตัวแบบสุ่ม ซึ่งเฟสของสัญญาณจะแปรผันตามตำแหน่งของโนด ดังนั้นการชิงโครโมสเฟสจึงเป็นขั้นตอนสำคัญในวิธีการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการกระจายตัวของเฟสของโนดที่มีการกระจายตัวแบบสุ่มในพื้นที่ขนาดเล็ก
2. เพื่อศึกษาผลกระทบการกระจายตัวของเฟสที่มีต่อระบบการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย
3. เพื่อศึกษาการใช้เครื่องมือวัด Network Analyzer เพื่อวัดเฟส

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาการกระจายตัวของเฟสของโนดที่มีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ
2. ศึกษาผลกระทบการกระจายตัวของเฟสที่มีต่อระบบการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย
3. กำหนดให้โนดทั้งภาครับและภาคส่งใช้งานที่ 2.6 GHZ
4. กำหนดให้จำนวน โหนดที่ทดสอบเท่ากับ 28 โหนด
5. กำหนดให้ขอบเขตการกระจายตัวของ โหนดอยู่ในพื้นที่ขนาดเล็ก ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 60x70 ซม. โดยอ้างอิงจากขนาดโต๊ะทำงาน
6. กำหนดพื้นที่การทดลองคือแลปโทรคมนาคมที่ F4 โดยกำหนดจุดการทดลองเป็น 4 กรณี คือ
 - LOS ใกล้
 - LOS ไกล
 - Non-LOS ใกล้
 - Non-LOS ไกล

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1. ได้ข้อมูลการกระจายตัวของเฟส ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ผลกระทบของการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายได้
2. สามารถใช้เครื่องมือวัด Network Analyzer ได้ถูกต้อง

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

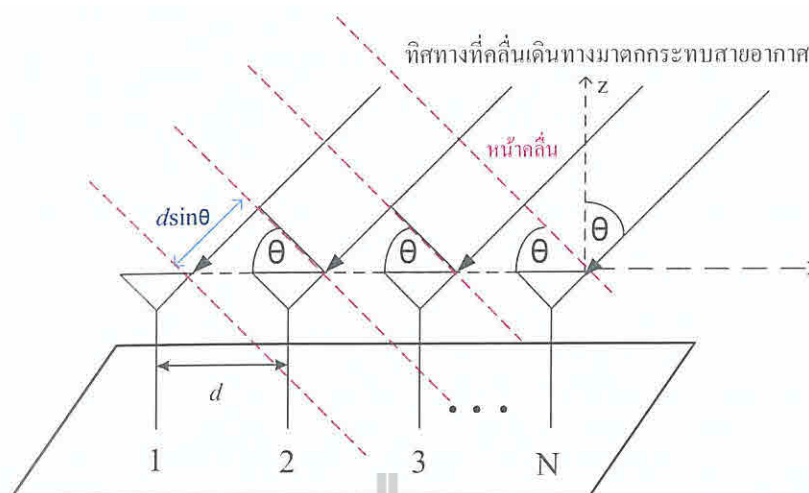
2.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันเครือข่ายของระบบการสื่อสารไร้สาย (wireless communication system) เช่น เครือข่ายการสื่อสารท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Networks: WLANs) [3] ได้รับความนิยมนำไปใช้งานเป็นอย่างมาก เนื่องจากเครือข่ายไม่จำเป็นต้องอาศัยสายส่งสัญญาณจึงสามารถสื่อสารได้ทุกที่ที่ราบที่ยังอยู่ในเครือข่าย แต่การสื่อสารไร้สายมีจุดด้อยที่มีขอบเขตการส่งข้อมูลที่จำกัด เนื่องจากสัญญาณที่ถูกส่งออกไปในอากาศจะถูกลดทอนลงไปตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเทคนิคที่เพิ่มระยะทางการสื่อสารหรือการเพิ่มกำลังสัญญาณที่ปลายทางรับได้โดยวิธีการก่อรูปลำคลื่นแบบหันพู่หลักได้ ซึ่งการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายสามารถเพิ่มระยะการส่งสัญญาณได้ด้วยการอาศัยความร่วมมือการส่งสัญญาณจาก โหนดข้างเคียง โดยแต่ละ โหนดจะส่งสัญญาณข้อมูลเดียวกัน พร้อมๆกัน และสำคัญคือต้องปรับเฟสของสัญญาณที่เดินทางไปถึงปลายทางให้เท่ากัน ซึ่งในความเป็นจริงเราไม่ทราบถึงตำแหน่งที่แน่นอนของ โหนด เนื่องจากตำแหน่งของ โหนดมีการกระจายตัวแบบสุ่มจึงจำเป็นต้องทำการซิงโครไนซ์เฟสคือ สัญญาณของแต่ละ โหนดจะต้องไม่หักล้างกันเองเมื่อรวมสัญญาณกันที่สถานีฐาน

โดยในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีประกอบด้วย สายอากาศแถวลำดับ การก่อรูปลำคลื่น และการซิงโครไนซ์เฟส ทั้งนี้เพื่อให้ผู้อ่านได้รับความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับลักษณะของโครงการนี้

2.2 สายอากาศแถวลำดับ

สายอากาศแถวลำดับ (Antenna array) เป็นระบบที่นำเอาสายอากาศมาวางเรียงกันในรูปแบบต่าง ๆ โดยอาจมีการป้อนสัญญาณเข้าที่ตัวสายอากาศต้นเดียวหรือหลายต้นเพื่อแผ่กระจายคลื่นออกไป การก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเองหรือระบบสายอากาศเก่ง (smart antennas) แบบดั้งเดิม [4] จำเป็นที่จะต้องใส่สายอากาศในรูปแบบแถวลำดับเท่านั้นจึงจะสามารถหันพู่คลื่นหลัก ไปยังทิศทางที่ต้องการได้ด้วยกระบวนการถ่วงน้ำหนักหรือปรับเฟสที่สายอากาศแต่ละต้น ซึ่งสายอากาศแถวลำดับจะมีการวางตัวหลายรูปแบบเช่น แบบเส้น ระนาบและวงกลม



รูปที่ 2.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น

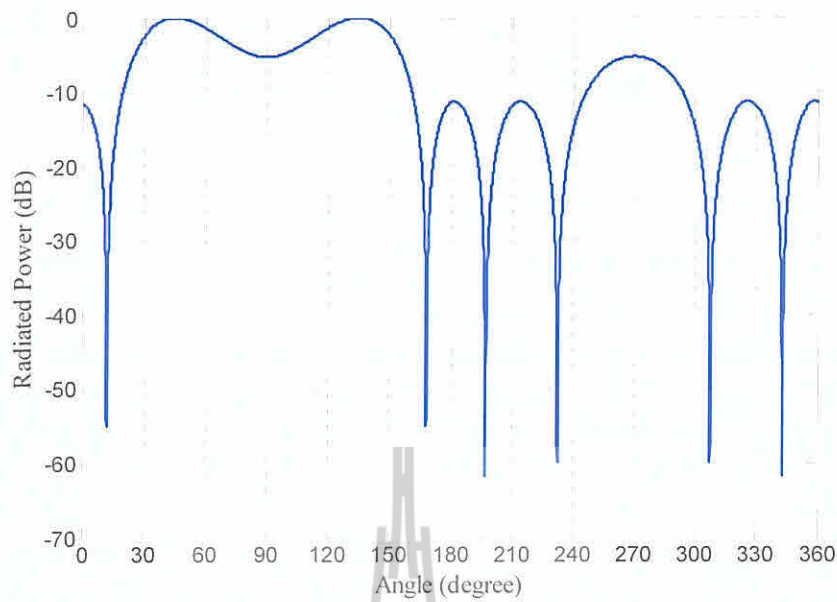
2.2.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเส้น

สายอากาศแถวลำดับแบบเส้น (linear array antenna) [5] เป็นสายอากาศแถวลำดับที่ พื้นฐานและมีโครงสร้างที่เรียบง่ายที่สุด คือประกอบด้วยสายอากาศแต่ละต้นวางตัวเรียงกันเป็น เส้นตรงซึ่งอาจจะมีระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ สายอากาศแถว ลำดับในรูปที่ 2.2 เป็นสายอากาศแบบเส้นจำนวน N ต้น หรือ $N \times 1$ ในการวางตัวสายอากาศของ สายอากาศแถวลำดับจำเป็นต้องคำนึงถึงระยะห่าง d ของสายอากาศแต่ละต้น เนื่องจาก ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นนั้นจะมีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งโดยปกติ แล้วสายอากาศแต่ละต้นจะวางตัวห่างกันเท่ากับครึ่งความยาวคลื่น ซึ่งการคำนวณหาระยะห่าง ระหว่างสายอากาศแต่ละต้นนั้น สามารถหาได้จากสมการที่ (2.1)

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (2.1)$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่น

จากรูปที่ 2.2 ถ้ากำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันทุกต้นและสายอากาศแต่ละต้นมีกำลังส่งสัญญาณเท่ากัน ซึ่งสายอากาศแถวลำดับที่มีรูปแบบดังกล่าวจะเรียกว่าแถวลำดับ สมบูรณ์ (uniform array) เราสามารถหาค่าพลังงานของสายอากาศแถวลำดับนี้จากการคูณกัน

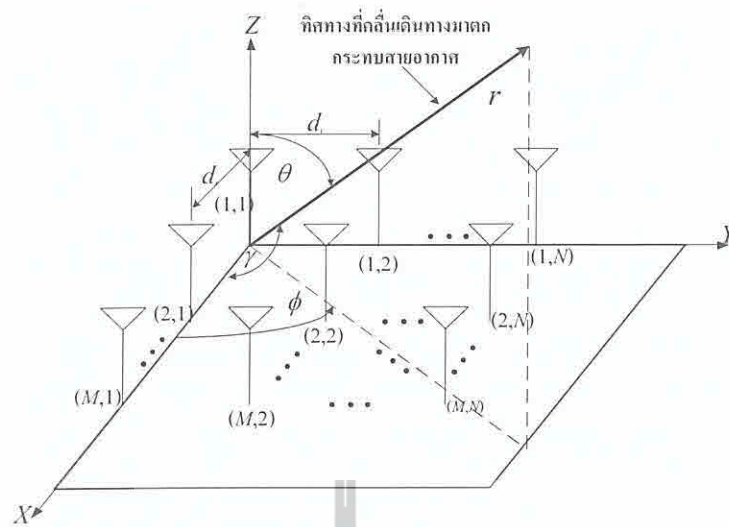


รูปที่ 2.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน 4×1

ระหว่างค่าพลังงานของสายอากาศต้นเดียวที่จุดอ้างอิงหรือจุดกำเนิดกับตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor: AF) ตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 AF &= 1 + e^{+j(kd \sin \theta + \beta)} + e^{+j2(kd \sin \theta + \beta)} + \dots + e^{+j(N-1)(kd \sin \theta + \beta)} \\
 &= \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)kd(\sin \theta + \beta)} \\
 &= \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\Psi}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

ดังนั้นสามารถนำเอาสมการ (2.2) มาจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบเส้นตามที่แสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อจำนวนสายอากาศเท่ากับ 4 ต้น และแต่ละต้นวางตัวห่างกัน $d = \lambda/2$ ทิศทางของพูหลักคือ $\theta = 45^\circ$ เมื่ออ้างอิงกับแกน z ตามที่แสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้นความต่างเฟสของ



รูปที่ 2.3 สายอากาศแถวลำดับระนาบจำนวน $M \times N$

สายอากาศแต่ละต้นคือ $\beta = -kd \sin 45^\circ$ ซึ่งจะแตกต่างกันตามลำดับของสายอากาศ $(N-1)$ ตามที่แสดงในสมการ (2.2) จากรูปจะเห็นว่าพหุคูณสามารถชี้ไปที่ทิศ 45° เนื่องจากเฟสของสายอากาศแต่ละต้นจะเท่ากันถ้าเดินทางไปในทิศ $\theta = 45^\circ$ ซึ่งจะเห็นได้จากการนำเอาค่าความต่างเฟส $\beta = -kd \sin 45^\circ$ แทนค่ากลับเข้าไปในสมการ (2.2) จะได้เฟสของสายอากาศแต่ละต้นเท่ากัน ซึ่งส่งผลให้ได้สัญญาณรวมสูงสุด นอกจากนี้จะเห็นว่ายังมีพหุคูณชี้ไปในฝั่งตรงข้ามของสายอากาศที่ทิศ 135° เนื่องจากสมการตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นตามที่แสดงในสมการ (2.2) จะมีค่าสูงสุดทั้งหมด 2 ค่า คือที่ทิศ 45° และ 135°

2.2.2 สายอากาศแถวลำดับระนาบ

สายอากาศแถวลำดับระนาบ (Planar array antenna) [6] เป็นรูปแบบที่ประยุกต์มาจากรูปแบบสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นที่ได้อธิบายใน 2.2.1 สายอากาศแต่ละตัวถูกจัดวางตัวเป็นสี่เหลี่ยม โดยสายอากาศแถวลำดับระนาบจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ยืดหยุ่นกว่าแบบเส้น คือสามารถควบคุมและเปลี่ยนแปลงแบบรูปการแผ่พลังงานได้หลากหลาย ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับระนาบมีความเอนกประสงค์มากและสามารถให้แบบรูปการแผ่พลังงานที่มีความสมดุลและมีพูรองที่ต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นสายอากาศแถวลำดับระนาบสามารถที่จะหันพหุคูณในมุมเฉยและทุก ๆ ทิศ

รอบตัว 360° ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับระนาบจึงเหมาะกับการนำไปใช้ในงานเรดาร์ การสื่อสาร ไร้สาย รวมถึงการก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเองอีกด้วย

ค่าตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับระนาบ สามารถคำนวณหาได้โดยเริ่มจาก พิจารณามุม γ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.3 ได้ดังนี้

$$\cos \gamma = \hat{x} \cdot \hat{r} = \hat{x} \cdot (\hat{x} \sin \theta \cos \phi + \hat{y} \sin \theta \sin \phi + \hat{z} \cos \theta) = \sin \theta \cos \phi \quad (2.3)$$

เมื่อ \hat{x} \hat{y} \hat{z} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแกน x y และ z ตามลำดับ \hat{r} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของทิศทางของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศ r โดย θ คือทิศทางของคลื่นเมื่ออ้างอิงกับแกน z และ ϕ คือทิศทางของคลื่นเมื่ออ้างอิงกับแกน x บนระนาบ x - y และ γ คือทิศทางของคลื่นเมื่ออ้างอิงกับแกน x บนระนาบ x - z ตามที่แสดงในรูปที่ 2.3

เมื่อพิจารณาเฉพาะแนวแกน x เราจะได้ค่าตัวประกอบแถวลำดับดังนี้

$$\begin{aligned} AF_x &= \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \cos \gamma + \beta_x)} \\ &= \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \end{aligned} \quad (2.4)$$

เมื่อ I_{m1} คือค่าสัมประสิทธิ์กระแสกระตุ้นของสายอากาศแต่ละต้น d_x คือระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน x และ k คือหมายเลขคลื่น (wave number) $k = 2\pi/\lambda$ และ β_x คือค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน x เมื่อพิจารณาเฉพาะแนวแกน y ซึ่งเช่นเดียวกันกับกรณีที่พิจารณาเฉพาะแกน x เราจะได้ค่าตัวประกอบแถวลำดับเท่ากับ

$$AF_y = \sum_{n=1}^N I_{1n} e^{j(m-1)(kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y)} \quad (2.5)$$

เมื่อ I_{1n} คือค่าสัมประสิทธิ์กระแสกระตุ้นของสายอากาศแต่ละต้น d_y คือระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน y และ β_y คือค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน y ดังนั้นเราสามารถหาค่าตัวประกอบแถวลำดับของทั้งแกน x และ y รวมกันหรือที่เรียกว่าระนาบได้ด้วยการคูณค่าตัวประกอบแถวลำดับของทั้งแกน x และ y เข้าด้วยกันจะได้

$$AF = \sum_{n=1}^N I_{1n} \left[\sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \right] e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y)} \quad (2.6)$$

สมมติให้กำลังส่งสัญญาณของสายอากาศแต่ละต้นทั้งในแกน x และ y มีค่าเท่ากัน ดังนั้นจะได้

$$I_{mn} = I_{m1} I_{1n} \quad (2.7)$$

และกำหนดให้กำลังส่งสัญญาณของสายอากาศแต่ละต้นมีค่าเท่ากับหนึ่งหน่วยจะได้ $I_{mn} = I_0$ ดังนั้นเราสามารถลดรูปสมการ (2.7) ลงเหลือเท่ากับ

$$AF = I_0 \sum_{m=1}^M e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y)} \quad (2.8)$$

เราสามารถทำสมการค่าตัวประกอบแถวลำดับให้อยู่ในรูปมาตรฐานได้โดยใช้ฟังก์ชันไซน์

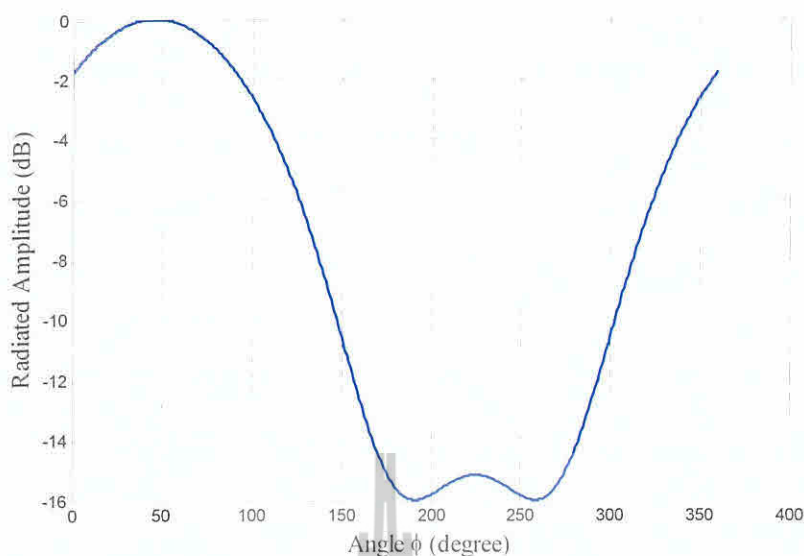
$$AF_n(\theta, \phi) = \left\{ \frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right\} \left\{ \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right\} \quad (2.9)$$

เมื่อ

$$\psi_x = kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x \quad (2.10)$$

$$\psi_y = kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y \quad (2.11)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.9) เราสามารถจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับระนาบ 2×2 ตามที่แสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อสายอากาศแต่ละต้นวางตัวห่างกัน $\lambda/4$ และทิศทางของพูลหลักคือ $\theta = 90^\circ$ เมื่ออ้างอิงกับแกน z และ $\phi = 45^\circ$ เมื่ออ้างอิงกับแกน x ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.4 ดังนั้นจากสมการที่ (2.10) และ (2.11) ค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นคือ $\beta_x = -kd_x \sin 90^\circ \cos 45^\circ$ และ $\beta_y = -kd_y \sin 90^\circ \cos 45^\circ$ จากรูปจะเห็นว่าพูลหลักสามารถหันไปในทิศ $\phi = 45^\circ$ เมื่ออ้างอิงกับแกน x ตามที่แสดงในรูปที่ 2.4 ได้ เนื่องจากเฟสของสายอากาศแต่ละต้นจะเท่ากันถ้าเดินทางไปในทิศ $\theta = 90^\circ$ และ $\phi = 45^\circ$ ซึ่งจะเห็นได้จากการนำเอาค่าความต่าง



รูปที่ 2.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับระนาบจำนวน 2×2

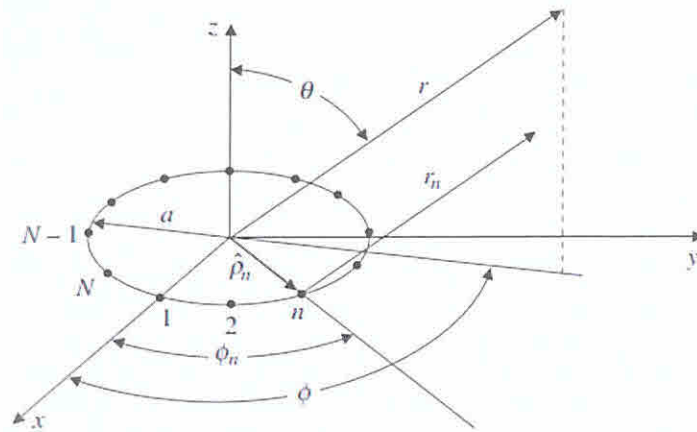
เฟส $\beta_x = -kd_x \sin 90^\circ \cos 45^\circ$ และ $\beta_y = -kd_y \sin 90^\circ \cos 45^\circ$ แทนกลับไปในสมการค่าตัวประกอบแถวลำดับ (2.15) จะทำให้ได้ผลรวมสัญญาณสูงสุด

2.2.3 สายอากาศแถวลำดับวงกลม

ในบางกรณีที่สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นที่มีลักษณะขนาดใหญ่ไม่สามารถนำมาติดตั้งได้เนื่องจากข้อจำกัดทางพื้นที่ที่จะนำไปติดตั้งเช่นบนบนเพดานหรือบนหลังคาหลังการเป็นต้น สายอากาศแถวลำดับวงกลม (Circular array antenna array) [7] จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาใช้ โดยสายอากาศแถวลำดับวงกลมมีข้อดีเช่นเดียวสายอากาศแถวลำดับระนาบ คือสามารถที่จะหันพู่หลักในมุมเงยและทุก ๆ ทิศรอบตัว 360° โดยรูปที่ 2.5 แสดงแบบจำลองของสายอากาศแถวลำดับวงกลม ที่มีสายอากาศจำนวน N ต้นที่วางอยู่บนระนาบ $x-y$ โดยตำแหน่งของสายอากาศแต่ละต้นจะถูกระบุด้วยรัศมี a และมุม ϕ_n ตามที่แสดงในรูปที่ 2.5 โดยเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของสายอากาศแต่ละต้นคือ

$$\hat{\rho}_n = \cos \phi_n \hat{x} + \sin \phi_n \hat{y} \quad (2.12)$$

และเราสามารถกำหนดให้เวกเตอร์ทิศทางที่พิจารณาในสนามระยะไกลคือ



รูปที่ 2.5 สายอากาศแถวลำดับวงกลมจำนวน N ต้น [20]

$$\hat{r} = \sin \theta \cos \phi \hat{x} + \sin \theta \sin \phi \hat{y} + \cos \theta \hat{z} \quad (2.13)$$

จากรูปที่ 2.4 เวกเตอร์ \hat{r}_n จะมีขนาดเล็กกว่าเวกเตอร์ \hat{r} เท่ากับขนาดของสเกลาร์ของ $\hat{\rho}_n$ ที่ตั้งฉากกับ \hat{r} ดังนั้น

$$r_n = r - a \hat{\rho}_n \cdot \hat{r} \quad (2.14)$$

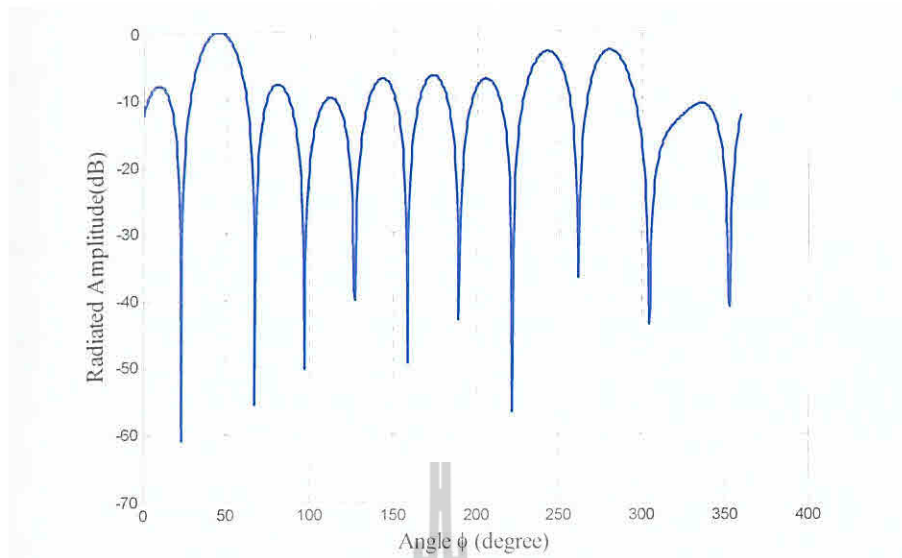
เมื่อ a คือตำแหน่งเชิงรัศมีของสายอากาศแต่ละต้นและ

$$\begin{aligned} \hat{\rho}_n \cdot \hat{r} &= \sin \theta \cos \phi \cos \phi_n + \sin \theta \sin \phi \sin \phi_n \\ &= \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) \end{aligned} \quad (2.15)$$

จากรูปที่ 2.6 เมื่อ θ คือทิศทางของพู่หลักเมื่ออ้างอิงกับแกน z และ ϕ คือทิศทางของพู่หลักเมื่ออ้างอิงกับแกน x และ ϕ_n คือตำแหน่งเชิงมุมของสายอากาศแต่ละต้น

เช่นเดียวกับสายอากาศแถวลำดับระนาบ เมื่อได้เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางที่สนใจแล้ว จะสามารถหาสมการค่าตัวประกอบแถวลำดับดังนี้

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{-j(k a \hat{\rho}_n \cdot \hat{r} + \delta_n)}$$



รูปที่ 2.6 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมจำนวน 10 ต้น

$$= \sum_{n=1}^N e^{-j[k a \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) + \delta_n]} \quad (2.16)$$

เมื่อ k คือหมายเลขคลื่น (Wave number) $k = 2\pi/\lambda$ δ_n คือค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้น และในกรณีที่สายอากาศวางตัวห่างกันอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นตำแหน่งเชิงมุมของสายอากาศแต่ละต้น ϕ_n สามารถคำนวณได้จาก

$$\phi_n = \frac{2\pi}{N} (n-1) \quad (2.17)$$

ถ้าเราให้ทิศทางของพหุคูณอยู่ที่ (θ_0, ϕ_0) ดังนั้นค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นจะเท่ากับ $\delta_n = -k a \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n)$ ซึ่งจะได้ค่าตัวประกอบแถวลำดับในทิศทาง (θ_0, ϕ_0) ดังนี้

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{-j\{k a [\sin \theta \cos(\phi - \phi_n) - \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n)]\}} \quad (2.18)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.18) เราสามารถจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับวงกลมตามที่แสดงในรูปที่ 2.6 โดยที่มีจำนวนสายอากาศ $N = 10$ ต้น รัศมีของแถวลำดับ $a = \lambda$ และทิศทางของพหุคูณของการก่อรูปลำคลื่นคือ $\theta_0 = 90^\circ$ เมื่ออ้างอิงกับแกน z และ $\phi_0 = 45^\circ$ เมื่ออ้างอิงกับแกน x ตามที่แสดงในรูปที่ 2.5 ดังนั้นค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละ

ต้นของสายอากาศแกลวลำดับวงกลม คือ $\delta_n = 2\pi \sin 90^\circ \cos(45^\circ - \phi_n)$ จากรูปจะเห็นว่าพหุคูณสามารถหันไปในทิศ $\phi_0 = 45^\circ$ ได้ เนื่องจากเฟสของสายอากาศแต่ละต้นจะเท่ากันถ้าเดินทางไป

ในทิศ $\theta_0 = 90^\circ$ และ $\phi_0 = 45^\circ$ ซึ่งเห็นได้จากถ้านำค่าความต่างเฟสในทิศทางดังกล่าวแทนค่ากลับไปในสมการค่าตัวประกอบแกลวลำดับ (2.18) จะได้เฟสสายอากาศแต่ละต้นเท่ากัน

2.3 การก่อรูปลำคลื่น

การก่อรูปลำคลื่น [8],[9] คือ วิธีการประมวลผลสัญญาณสำหรับระบบที่มีสายอากาศมากกว่าหนึ่งต้น เพื่อที่สามารถสร้างแบบรูปลำคลื่นที่มีพหุคูณหันไปยังทิศทางที่ต้องการและสามารถหันลำคลื่น (null) ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งยกตัวอย่างการนำเอาการก่อรูปลำคลื่นไปใช้งานที่สถานีฐานในเครือข่ายโทรศัพท์ไร้สาย จะเห็นว่าการก่อรูปลำคลื่นสามารถหันพหุคูณไปยังทิศทางที่ต้องการนั้นคือโทรศัพท์ไร้สาย และสามารถหันลำคลื่นไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดที่อาจมาจากสถานีฐานอื่นในเครือข่ายข้างเคียง ด้วยความสามารถดังกล่าวส่งผลให้การก่อรูปลำคลื่นสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพให้กับระบบการสื่อสารไร้สายได้ดังนี้

- 1) เพิ่มอัตราขยายของสายอากาศตั้งต้นจึงขยายพื้นที่ครอบคลุมให้กว้างขึ้น และทำให้ความเร็วในการสื่อสารข้อมูลสูงขึ้น
- 2) เนื่องจากการก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเองสามารถหันพหุคูณไปเฉพาะในทิศทางที่ต้องการเท่านั้น จึงไม่สูญเสียพลังงานไปในทิศทางอื่นทำให้ประหยัดพลังงานและยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่
- 3) ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบให้ดีขึ้น
- 4) ลดสัญญาณแทรกสอด

ด้วยข้อดีดังกล่าวการก่อรูปลำคลื่นจึงได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลาย ๆ งาน เช่น เรดาร์ โซนาร์ และการสื่อสารไร้สาย [10], [11] เป็นต้น

การก่อรูปลำคลื่นสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทคือการก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเองหรือการก่อรูปลำคลื่นโดยใช้สายอากาศแกลวลำดับและการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย หรือการก่อรูปลำคลื่น

ด้วยการอาศัยความร่วมมือ โดยการก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเองจะอาศัยอากาศแถวลำดับที่มีตำแหน่งของสายอากาศที่แน่นอนในการก่อรูปลำคลื่นดังนั้นถูกข่ายหรือ โหนด (Node) ขณะที่การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายจะอาศัยความร่วมมือจากโหนดอื่น ๆ ที่อยู่ข้างเคียงที่มีการกระจายตัว



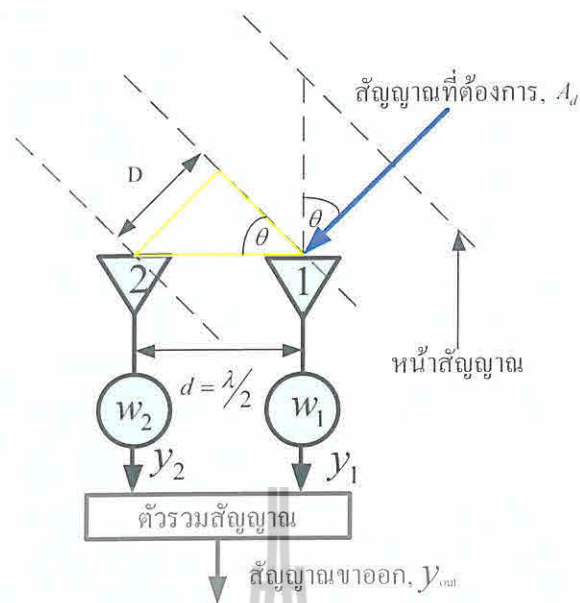
รูปที่ 2.7 การก่อรูปลำคลื่นที่มีพหุหลักหัน ไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการ และมีนัลล์หันไป ยังสัญญาณแทรกสอด

แบบสุ่มมาช่วยก่อรูปลำคลื่น ดังนั้นแต่ละ โหนดจึงไม่จำเป็นต้องใช้สายอากาศแถวลำดับเหมือนการก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเอง โดยการก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเองจะอธิบายในหัวข้อที่ 2.3.1 และการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายจะอธิบายในหัวข้อที่ 2.3.2

2.3.1 การก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเอง

การก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเองหรือสายอากาศเก่งแบบดั้งเดิม [4], [7], [12] ได้เริ่มพัฒนามาตั้งแต่ในช่วงปี ค.ศ.1980 เป็นต้นมา แต่เดิมการก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเองได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในระบบเรดาร์แต่ต่อมาได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับงานสื่อสารไร้สาย ซึ่งการก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเองจะประกอบด้วยกลุ่มของสายอากาศหลาย ๆ ต้น จัดเรียงตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ กัน ตามที่ได้อธิบายใน ส่วนที่ 2.2 ร่วมกับการประมวลผลสัญญาณเพื่อที่จะหันพหุหลักไปในทิศทางที่ต้องการ

การก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเองประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ สายอากาศแถวลำดับและชุดประมวลผลสัญญาณ ซึ่งระบบนี้สามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้โดยการหันพหุหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการได้ โดยหลักการเบื้องต้นในการที่จะหันพหุหลักสามารถอธิบายได้โดย



รูปที่ 2.8 ระบบการก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเองเมื่อใช้สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน 2 ชั้น

ยกตัวอย่างการใช้ระบบสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน 2 ชั้นตามที่แสดงในรูปที่ 2.8 เมื่อ D คือความต่างของระยะทางของสัญญาณที่เดินทางมาตกกระทบสายอากาศแต่ละชั้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ $d \sin \theta$ จากรูปสัญญาณที่สายอากาศแต่ละชั้นรับได้คือ

$$y_1 = w_1 A_d e^{j(kd \sin \theta)(n-1)} = w_1 A_d \quad (2.19)$$

$$y_2 = w_2 A_d e^{-j(kd \sin \theta)(n-1)} = w_2 A_d e^{-j(kd \sin \theta)} \quad (2.20)$$

เมื่อ d คือระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละชั้น w_n คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณ และ A_d คือสัญญาณที่ต้องการที่เดินทางมาตกกระทบสายอากาศในมุม θ ดังนั้นสัญญาณขาออก หรือ y_{out} คือ

$$\begin{aligned} y_{out} &= y_1 + y_2 \\ &= w_1 (A_d) + w_2 (A_d e^{-j(kd \sin \theta)}) \\ &= A_d (w_1 + w_2 e^{-j(kd \sin \theta)}) \end{aligned} \quad (2.21)$$

หลักการสำคัญของ การก่อรูปลำคลื่นที่จะสามารถหันพู่หลักไปในทิศทางที่ต้องการได้ คือการปรับเฟสของสัญญาณที่รับเข้ามาด้วย w_n ที่เหมาะสม หรือในกรณีนี้เราต้องการปรับเฟสเพื่อให้ได้รับสัญญาณที่ต้องการสูงสุด ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก w_n คือ

$$w_1 = e^{j(0)} \quad (2.22)$$

และ

$$w_2 = e^{j(kd \sin \theta)} \quad (2.23)$$

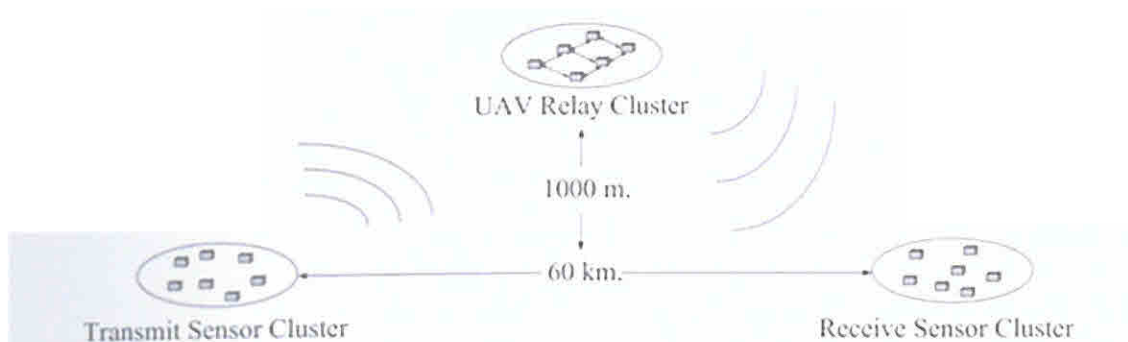
เมื่อแทนค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่ได้จากสมการ (2.22) และ (2.23) ลงใน (2.22) เราจะได้สัญญาณขาออกที่ได้สัญญาณที่ต้องการสูงสุดดังนี้

$$y_{out} = A_d \left(e^{j(0)} + e^{-j(kd \sin \theta)} e^{j(kd \sin \theta)} \right) = 2A_d \quad (2.24)$$

เนื่องจากการก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเองจำเป็นต้องติดตั้งสายอากาศแถวลำดับที่มีจำนวนสายอากาศหลายต้น ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองและยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปติดตั้งบนอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กที่มีพื้นที่จำกัด อีกทั้งการติดตั้งสายอากาศแถวลำดับยังเป็นการเพิ่มน้ำหนักให้กับอุปกรณ์ทำให้ไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ขนาดเล็กที่มีการเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายที่ใช้สายอากาศเพียงต้นเดียวต่ออุปกรณ์ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

2.3.2 การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย

การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย (distributed beamforming) เป็นวิธีการสื่อสารที่อาศัยการร่วมมือจากอุปกรณ์สื่อสารหรือ โหนดอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้เคียงกันในการก่อรูปลำคลื่น ซึ่งมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีสายอากาศแถวลำดับที่มีการสุ่มตำแหน่งของสายอากาศ (random array antenna) [13] โดยทุกโหนดที่ร่วมมือจะส่งสัญญาณที่มีข้อมูลเหมือนกันและส่งพร้อม ๆ กันไปที่สถานีฐาน โดยสัญญาณที่ถูกส่งออกไปจากแต่ละโหนดจำเป็นต้องถูกทำการซิงโครไนซ์เฟสเพื่อที่ไม่ให้เกิดการหักล้างกันเองคอนรวมสัญญาณที่สถานีฐาน [14] เมื่อแต่ละ โหนดมีเฟสของสัญญาณที่สถานีฐานเท่ากัน ดังนั้นการ



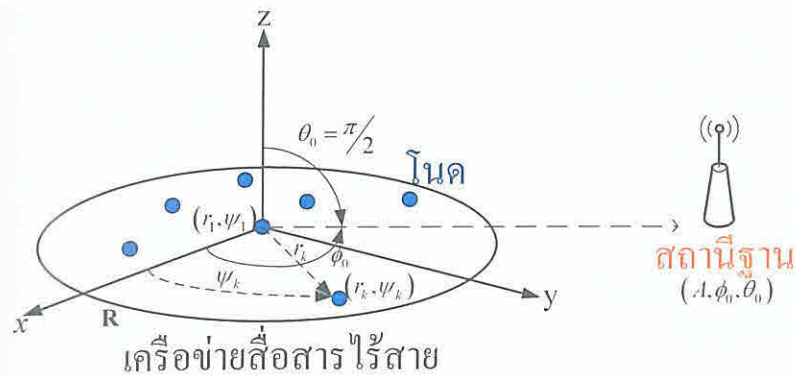
รูปที่ 2.9 การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายในการประยุกต์การใช้งานกับเครื่องบินไร้คนขับ [3]

ก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายจึงสามารถก่อรูปลำคลื่นที่มีพหุลักษณะไปยังสถานีฐานได้ ด้วยเหตุนี้การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายจึงสามารถเพิ่มระยะทางการสื่อสารและเพิ่มอัตราขยายซึ่งได้จากการก่อรูปลำคลื่น โดยมีอัตราขยายเฉลี่ยเท่ากับ

$$E[P_R] = 1 + (K - 1)(E[\cos \phi_k]) \quad (2.25)$$

เมื่อ K คือจำนวนโนดและ ϕ_k คือเฟสของสัญญาณแต่ละโนด จากสมการจะเห็นว่าในกรณีที่เฟสซิงโครไนซ์ได้สมบูรณ์คือไม่มีความต่างเฟสเลยหรือเฟสของทุกโนดเท่ากัน ผลรวมสัญญาณ $E[P_R]$ จะเท่ากับจำนวนโนดซึ่งเป็นค่าสูงสุด นอกจากนี้การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายยังสามารถหันทิศทางของพหุลักษณะไปยังทิศทางที่ต้องการ ดังนั้นจึงสามารถเพิ่มอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนและสัญญาณแทรกสอดได้เช่นเดียวกับการก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเอง แต่การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายมีข้อได้เปรียบที่ไม่ต้องการสายอากาศแถวลำดับในการก่อรูปลำคลื่น ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบที่มีโนดขนาดเล็กและมีพลังงานจำกัด

รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างการนำเอาการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายมาประยุกต์ใช้งานในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย โดยกลุ่มของเซนเซอร์ภาคส่งที่อยู่บนภาคพื้นดินร่วมมือกันก่อรูปลำคลื่นส่งไปที่กลุ่มของเครื่องบินไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) ซึ่งอยู่ไกลกับภาคส่งมากจนเกินกว่าที่เซนเซอร์โนดตัวเดียวจะส่งสัญญาณถึง เช่นเดียวกันกลุ่มของเครื่องบินไร้คนขับก็จะร่วมมือกันก่อรูปลำคลื่นกลับมาที่เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายภาครับที่อยู่ไกลมาก ๆ



รูปที่ 2.10 แบบจำลองระบบการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย

2.3.2.1 แบบจำลองการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย

แบบจำลองระบบการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายได้ถูกแสดงในรูปที่ 2.10 เนื่องจากเราไม่ทราบตำแหน่งที่แน่นอนของโน้ตในเครื่องข่ายการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายได้เหมือนกับตำแหน่งที่แน่นอนของสายอากาศในสายอากาศแบบแถวลำดับ ดังนั้นตำแหน่งของโน้ตจำนวน K ($k = 1, \dots, K$) จะถูกสุ่มแบบสม่ำเสมออยู่บนระนาบ (x, y) และตำแหน่งของโน้ตจะถูกอ้างอิงอยู่ในรูปเชิงขั้ว (r_k, ψ_k) โดยที่ r_k คือตำแหน่งของโน้ตในเชิงรัศมี $r_k = \sqrt{x_k^2 + y_k^2}$ และ ψ_k คือตำแหน่งของโน้ตในเชิงมุม $\psi_k = \tan^{-1}(y_k/x_k)$ ขณะที่ตำแหน่งของสถานีปลายทางถูกอ้างอิงในรูปของเชิงทรงกลม (A, ϕ_0, θ_0) เช่นเดียวกับทฤษฎีสายอากาศแถวลำดับวงกลม [20] มุมจะถูกกำหนดอยู่ในช่วง $\theta \in [0, \pi]$ ขณะที่มุมแอซิมัทถูกกำหนดอยู่ในช่วง $\phi \in [\pi, -\pi]$ นอกจากนี้ในการจำลองแบบการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายเรายังกำหนดให้

- 1) ตำแหน่งของโน้ตถูกสุ่มให้กระจายตัวแบบสม่ำเสมออยู่บนระนาบ (x, y) ในขอบเขตรัศมีเครื่องข่าย R
- 2) กำหนดให้ตำแหน่งของสถานีฐานตั้งอยู่บนระนาบ (x, y) เช่นเดียวกันกับโน้ต ดังนั้น $\theta_0 = \pi/2$
- 3) กำหนดให้โน้ตและสถานีฐานติดตั้งสายอากาศแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวจำนวน 1 คู่

- 4) กำหนดให้กำลังส่งสัญญาณและการสูญเสียเชิงวิถี (path loss) ของทุก โหนดมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์แบบรูปพลังงานได้ในรูปแบบเดียวกับสายอากาศแอมป์แบบปรกติได้
- 5) กำหนดให้ โหนดแต่ละ โหนดอยู่ห่างกันพอที่จะละเว้นการคำนวณถึงผลกระทบจากปรากฏการณ์เชื่อมต่อกัน

กำหนดให้ $d_k(\phi, \theta)$ คือระยะห่างระหว่าง โหนดที่ k กับสถานีฐานซึ่งสามารถคำนวณได้จาก สมการระยะทางแบบยูคลิดีเซียน (Euclidean distance)

$$d_k(\phi, \theta) = \sqrt{A^2 + r_k^2 - 2r_k A \sin \theta \cos(\phi - \psi_k)} \quad (2.26)$$

และเฟสเริ่มต้นของแต่ละ โหนดในกรณีที่ทำซิงโครไนซ์เฟสแบบมีการอ้างอิงสัญญาณจากสถานีฐาน สามารถคำนวณได้จาก

$$\Psi_k = -\frac{2\pi}{\lambda} d_k(\phi_0, \theta_0) \quad (2.27)$$

ดังนั้นจาก (2.26) และ (2.27) สามารถคำนวณหาสมการตัวประกอบแอมป์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} F(\phi, \theta, r, \psi) &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{j\Psi_k} e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d_k(\phi, \theta)} \\ &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{j\frac{2\pi}{\lambda} [d_k(\phi, \theta) - d_k(\phi_0, \theta_0)]} \end{aligned} \quad (2.28)$$

เมื่อ K คือจำนวน โหนดทั้งหมด และ λ คือความยาวคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้งาน

เมื่อพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานที่สนามไกลจึงสามารถกำหนดให้ $A \ll r_k$ ดังนั้นสมการที่ (2.26) จึงสามารถสรุปลงได้เป็น

$$d_k(\phi, \theta) \equiv A - r_k \sin \theta \cos(\phi - \psi_k) \quad (2.29)$$

ดังนั้นสมการค่าตัวประกอบแอมป์ที่มีแบบรูปสนามไกล ในกรณีที่ทำซิงโครไนซ์เฟสแบบมีการอ้างอิงสัญญาณจากสถานีฐานคือ

$$F(\phi, \theta | r, \psi) \approx \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{j \frac{2\pi}{\lambda} r_k [\sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \psi_k) - \sin \theta \cos(\phi - \psi_k)]} \quad (2.30)$$

เช่นเดียวกันกับ (2.27) เฟสเริ่มต้นของแต่ละ โหนดในกรณีที่ทำซิงโครไนซ์เฟสแบบไม่มีการอ้างอิงสัญญาณจากสถานีฐานคือ

$$\Psi_k^\dagger = \frac{2\pi}{\lambda} r_k \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \psi_k) \quad (2.31)$$

ดังนั้นสมการค่าตัวประกอบแอมพลิจูดในกรณีที่ทำซิงโครไนซ์เฟสแบบไม่มีการอ้างอิงสัญญาณจากสถานีฐานคือ

$$\begin{aligned} F^\dagger(\phi, \theta | r, \psi) &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{j \Psi_k^\dagger} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} d_k(\phi, \theta)} \\ &\approx \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{j \frac{2\pi}{\lambda} [A - r_k \sin \theta \cos(\phi - \psi_k) + r_k \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \psi_k)]} \\ &= e^{j \frac{2\pi}{\lambda} A} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{j \frac{2\pi}{\lambda} r_k [\sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \psi_k) - \sin \theta \cos(\phi - \psi_k)]} \end{aligned} \quad (2.32)$$

จากสมการที่ (2.30) และ (2.32) จะเห็นว่ารูปแบบของสมการที่ใกล้เคียงกับสมการตัวประกอบแอมพลิจูดของสายอากาศแอมพลิจูดแบบวงกลมตามที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.2.3 แต่ตำแหน่งของโหนดหรือสายอากาศ (r_k, ψ_k) จะถูกสุ่มซึ่งจำเป็นต้องทำซิงโครไนซ์เฟสเพื่อชดเชยความต่างเฟสที่เกิดจากการสุ่มตำแหน่งของโหนด ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี คือวิธีซิงโครไนซ์เฟสแบบมีการอ้างอิงสัญญาณจากสถานีฐาน ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ (2.27) โดยจะเห็นว่าต้องส่งสัญญาณไปกลับระหว่างโหนดเพื่อให้ได้ข้อมูลระยะห่างระหว่างโหนดกับสถานีฐานมาใช้ในการชดเชยเฟส ขณะที่อีกวิธีคือวิธีซิงโครไนซ์เฟสแบบไม่มีการอ้างอิงสัญญาณจากสถานีฐาน ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ (2.31) วิธีนี้จะส่งสัญญาณไปกลับระหว่างโหนดกันเองเพื่อให้รู้ตำแหน่งของแต่ละโหนดมาใช้ในการชดเชยเฟส และอาจต้องการข้อมูลทิศทางของสถานีฐาน (ϕ_0, θ_0) เพิ่มเติมเพื่อให้สามารถหันพู่คลื่นหลักไปในทิศทางของสถานีฐานได้ถูกต้อง โดยข้อมูลทิศทางของสถานีฐานอาจหาได้จากให้สถานีฐานส่งสัญญาณอ้างอิงมาที่โหนด

จากที่เรากำหนดให้ตำแหน่งของโนดถูกสุ่มให้มีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมออยู่บนระนาบ (x, y) ในขอบเขตรัศมีเครือข่าย R ดังนั้นฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (probability density function: pdf) ของตำแหน่งโนด (r_k, ψ_k) คือ

$$f_{r_k}(r) = \frac{2r}{R^2}, \quad 0 < r < R \quad (2.33)$$

$$f_{\psi_k}(\psi) = \frac{1}{2\pi}, \quad -\pi < \psi < \pi \quad (2.34)$$

และจากที่กำหนดให้ตำแหน่งของสถานีฐานอยู่บนระนาบ (x, y) เช่นเดียวกับโนด $\theta_0 = \pi/2$ ดังนั้นแบบสมการค่าตัวประกอบแถวลำดับสมการที่ (2.32) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} \tilde{F}(\phi | r, \psi) &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{j4\pi r_k \sin\left(\frac{\phi_1 - \phi}{2}\right) \sin\left(\psi_k - \frac{\phi_1 + \phi}{2}\right)} \\ &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{j4\pi \frac{R}{\lambda} \sin\left(\frac{\phi_1 - \phi}{2}\right) \tilde{r}_k \sin(\tilde{\psi}_k)} \end{aligned} \quad (2.34)$$

เมื่อ $\tilde{r}_k \triangleq r_k/R$ และ $\tilde{\psi}_k = \psi_k - ((\phi_1 + \phi)/2)$ และกำหนดให้

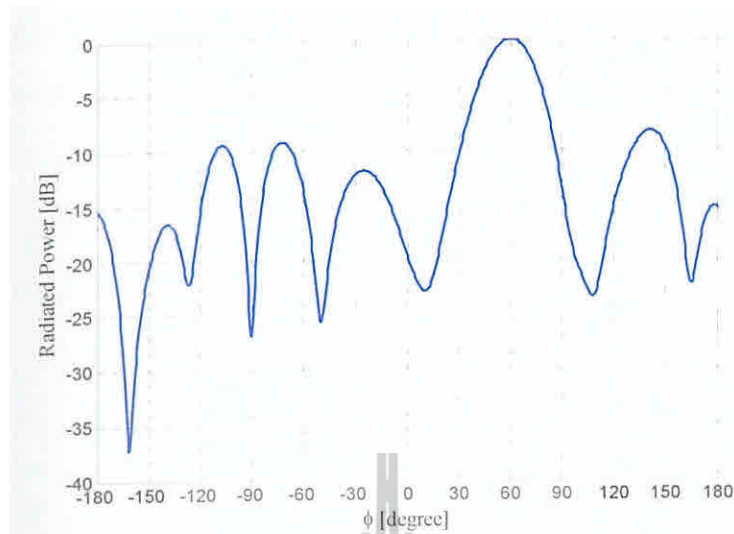
$$z_k \triangleq \tilde{r}_k \sin(\tilde{\psi}_k) \quad (2.35)$$

ซึ่ง z_k มีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นเท่ากับ

$$f_{z_k}(z) = \frac{2}{\pi} \sqrt{1-z^2}, \quad -1 \leq z \leq 1 \quad (2.36)$$

ดังนั้นจาก (2.42) และ (2.43) เราสามารถเขียนสมการค่าตัวประกอบแถวลำดับได้ดังนี้

$$\tilde{F}(\phi | z) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{j4\pi R \sin\left(\frac{\phi_1 - \phi}{2}\right) z_k} \quad (2.37)$$



รูปที่ 2.11 แบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย

เมื่อ $\tilde{R} \ll R/\lambda$ คือรัศมีของเครื่องข่ายที่ถูกนอร์มัลไลซ์กับความยาวคลื่น ϕ_0 คือทิศทางของสถานีฐานและ $|\phi| = \pi$ ดังนั้นสุดท้ายเราจะได้แบบรูปลำคลื่นที่สนามไกลของการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายดังนี้

$$\begin{aligned}
 P(\phi|z) &\approx |\tilde{F}(\phi|z)|^2 \\
 &= \tilde{F}(\phi|z) \tilde{F}^*(\phi|z) \\
 &= \frac{1}{K^2} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K e^{j4\pi\tilde{R}\sin\left(\frac{\phi_0-\phi}{2}\right)(z_k-z_l)} \\
 &= \frac{1}{K} + \frac{1}{K^2} \sum_{k=1}^K e^{j\alpha(\phi)z_k} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^K e^{-j\alpha(\phi)z_l}
 \end{aligned} \tag{2.38}$$

เมื่อ $\alpha(\phi) \approx 4\pi\tilde{R}\sin\left(\frac{\phi_0-\phi}{2}\right)$

รูปที่ 2.11 แสดงถึงแบบรูปการแผ่พลังงานของการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายในกรณีที่มีการชิงโครโนซ์เฟสสมบูรณ์ที่ได้จากสมการ (2.38) เมื่อกำหนดให้จำนวนโนด K เท่ากับ 16 โนด $\tilde{R} \ll 1$ และทิศทางของสถานีฐาน $\phi_0 = 60^\circ$ จะเห็นว่า การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายสามารถหันฟู

หลักไปยังสถานีฐานได้ เนื่องจากมีการปรับเฟสของแต่ละโนดให้เท่ากันด้วยการสมมุติให้ทราบตำแหน่งที่แน่นอนของโนด \tilde{r}_k และ $\tilde{\psi}_k$ ตามที่แสดงในสมการที่ (2.36) เมื่อมีการระบุตำแหน่งที่แน่นอนของโนด ดังนั้นโนดแต่ละโนดจึงสามารถปรับเฟสได้ถูกต้อง ซึ่งส่งผลให้ระบบการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายสามารถหันพู่หลักไปยังทิศทางของสถานีฐานได้เช่นเดียวกับสายอากาศแฉว ลำดับวงกลมที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.2.3 แต่ในความเป็นจริงแล้วเราจะไม่สามารถทราบตำแหน่งที่แน่นอนของโนดได้ ดังนั้นระบบการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายจึงจำเป็นต้องทำการซิงโครไนซ์เฟสในหัวข้อที่ 2.4

2.4 การซิงโครไนซ์เฟสแบบวงรอบปิดโดยอาศัยการป้อนกลับสัญญาณ 1 บิต

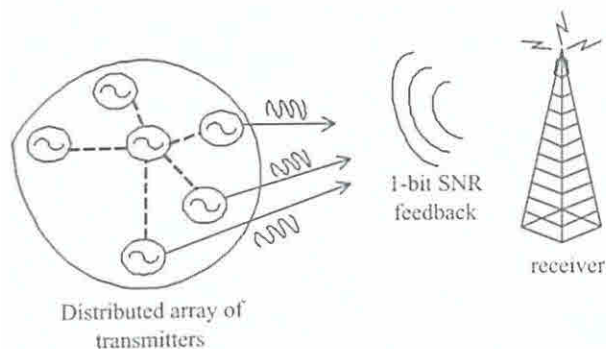
การซิงโครไนซ์เฟส (Phase synchronization) คือสัญญาณของแต่ละโนดจะต้องไม่หักล้างกันเองเมื่อรวมสัญญาณกันที่สถานีฐาน

การซิงโครไนซ์เฟสแบบวงรอบปิดโดยอาศัยการป้อนกลับสัญญาณ 1 บิต (one-bit feedback closed-loop synchronization) [1],[2] เป็นวิธีการที่อาศัยการป้อนสัญญาณอ้างอิงไปกลับระหว่างสถานีฐานและโนดเพื่อการซิงโครไนซ์เฟส โดยรูปที่ 2.12 แสดงแบบจำลองของการซิงโครไนซ์เฟสแบบวงรอบปิดโดยอาศัยการป้อนกลับสัญญาณ 1 บิต โนดแต่ละโนดจะส่งสัญญาณออกไปแบบสุ่มเฟส จากนั้นสถานีฐานจึงป้อนสัญญาณอ้างอิงกลับมา โดยสัญญาณเบสแบนด์ของแต่ละโนดที่ k ที่ถูกส่งไปหาสถานีฐานคือ

$$s_k(t) = A e^{j(\omega_c t + \theta_k)} x(t) \quad (2.39)$$

เมื่อ $\omega_c = 2\pi f_c$ คือย่านความถี่ที่ใช้งาน A คือกำลังส่งของสัญญาณที่ถูกนอร์มัลไลซ์ให้เท่ากับหนึ่ง $x(t)$ คือข้อมูลที่ต้องการส่ง และ θ_k คือเฟสของสัญญาณของแต่ละโนด โดยเป้าหมายของการซิงโครไนซ์เฟสแบบวงรอบปิดโดยอาศัยการป้อนกลับสัญญาณ 1 บิต คือต้องการปรับสัญญาณของแต่ละโนด $A e^{j(\omega_c t + \theta_k)}$ ให้มีเฟสเท่ากันหรือซิงโครไนซ์เฟสกัน โดยจากสมการ (2.39) จะได้สัญญาณรวมของทุก ๆ โนดที่สถานีฐานได้ดังนี้

$$Y = x(t) \sum_{k=1}^K \alpha_k A e^{j(\omega_c t + \gamma_k + \theta_k)} \quad (2.40)$$



รูปที่ 3.1 แบบจำลองระบบการซิงโครไนซ์เฟสแบบวงจรมอดูเลชันโดยอาศัยการป้อนกลับสัญญาณ 1 บิต [1]

เมื่อ K คือจำนวนโหนด α_k คือการลดทอนในช่องสัญญาณโดย $\alpha_k \geq 0$ และ γ_k คือความต่างเฟสที่เกิดขึ้นในกระบวนการซิงโครไนซ์ความถี่ เนื่องจากโหนดแต่ละโหนดใช้ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องที่ต่างกันซึ่งอาจส่งผลให้การซิงโครไนซ์ความถี่ในตอนแรกเกิดเฟสผิดพลาดขึ้นได้ในระบบ และ φ_k คือค่าความต่างเฟสที่เกิดขึ้นจากช่องสัญญาณ จาก (2.40) จะเห็นได้ว่าขนาดของผลรวมสัญญาณ Y จะขึ้นกับว่าเฟสของแต่ละโหนด $\theta_k + \gamma_k + \varphi_k$ นั้นเท่ากันหรือไม่ ดังนั้นในกระบวนการซิงโครไนซ์เฟสแบบวงจรมอดูเลชันโดยอาศัยการป้อนกลับสัญญาณ 1 บิต จึงมีการปรับเฟสของสัญญาณแต่ละโหนดโดยเริ่มจากการปรับเฟสของสัญญาณแบบสุ่มและส่งสัญญาณออกไปได้ดังนี้

$$Y_n = x(t) \sum_{k=1}^K \alpha_k A e^{j(\omega_c t + \Phi_k)} e^{j\delta_{k,n}} \quad (2.41)$$

เมื่อ $\Phi_k = \theta_k + \gamma_k + \varphi_k$ และ $\delta_{k,n}$ คือเฟสที่ถูกสุ่มขึ้นมาจากการส่งสัญญาณซ้ำครั้งที่ n โดยมีเป้าหมายเพื่อที่จะชดเชยความต่างเฟส θ_k จากนั้นสถานีฐานจะรับค่าสัญญาณที่ส่งเข้ามาครั้งแรก Y_1 และจะบันทึกกำลังรวมของสัญญาณที่ได้ไว้ หลังจากนั้นแต่ละโหนดจะส่งสัญญาณมาที่สถานีฐานซ้ำโดยปรับเฟสแบบสุ่ม $\delta_{k,n}$ อีกครั้ง เมื่อสถานีฐานรับสัญญาณได้ สถานีฐานจะเปรียบเทียบกำลังรวมของสัญญาณจากการส่งครั้งแรกกับครั้งที่สอง ถ้ากำลังรวมของสัญญาณของการส่งครั้งที่สองต่ำกว่าการส่งครั้งแรก สถานีฐานจะป้อนสัญญาณ บิต = 0 กลับไปที่โหนดเพื่อให้แต่ละโหนดยกเลิกการปรับเฟสที่ปรับครั้งล่าสุดและปรับเฟสแบบสุ่ม $\delta_{k,n}$ ขึ้นมาใหม่ แต่ถ้ากำลังรวมของ

สัญญาณของการส่งครั้งที่สองสูงกว่าการส่งครั้งแรก สถานีฐานจะป้อนสัญญาณ บิต = 1 กลับไปที่ โหนดซึ่งหมายความว่าให้แต่ละ โหนดจำค่าเฟส $\delta_{k,n}$ จากการส่งครั้งล่าสุดเอาไว้ แต่ยังคงปรับเฟสแบบ สุ่ม $\delta_{k,n+1}$ ขึ้นมาใหม่และส่งสัญญาณไปสถานีฐานอีกครั้ง ทำเช่นนี้ซ้ำไปเรื่อยเพื่อหาค่าเฟส $\delta_{k,n}$ ของแต่ละ โหนด ที่ให้สัญญาณรวม Y ที่มีกำลังรวมของสัญญาณสูงสุด โดยอัลกอริทึมของการ เปรียบเทียบกำลังรวมของสัญญาณสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\theta_{k,n+1} = \begin{cases} \theta_{k,n} + \delta_{k,n}, & Y_n > Y_best_n \\ \theta_{k,n}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.42)$$

เมื่อ Y_best_n คือสัญญาณรวมสูงสุดที่ได้จากการส่งสัญญาณครั้งที่ n ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$Y_best_n = \max_{k < n} Y_k \quad (2.43)$$

แต่จากที่แต่ละ โหนดมีการปรับค่าเฟสใหม่และส่งสัญญาณซ้ำ ๆ ดังนั้นผลรวมของสัญญาณสูงสุดที่ ได้จากการส่ง $n + 1$ ครั้งคือ

$$Y_best_{n+1} = \max_{k < n} (Y_best_n, Y_n) \quad (2.44)$$

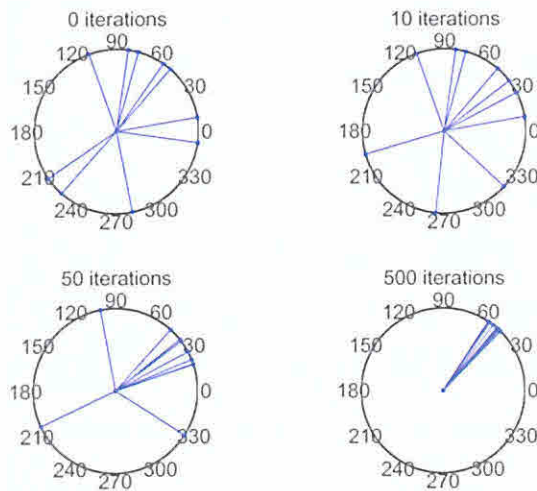
ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนของควาซิง โครโมโซมเฟสแบบวงรอบปิดโดยอาศัยการป้อนกลับสัญญาณ 1 บิตได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1) แต่ละ โหนดปรับเฟสแบบสุ่ม

ขั้นตอนที่ 2) แต่ละ โหนดส่งสัญญาณออกไปในรูปแบบการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย

ขั้นตอนที่ 3) สถานีฐานประมาณค่ากำลังสัญญาณรวมหรืออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณ

รบกวน (Signal-to-Noise Ratio: SNR) ที่รับได้



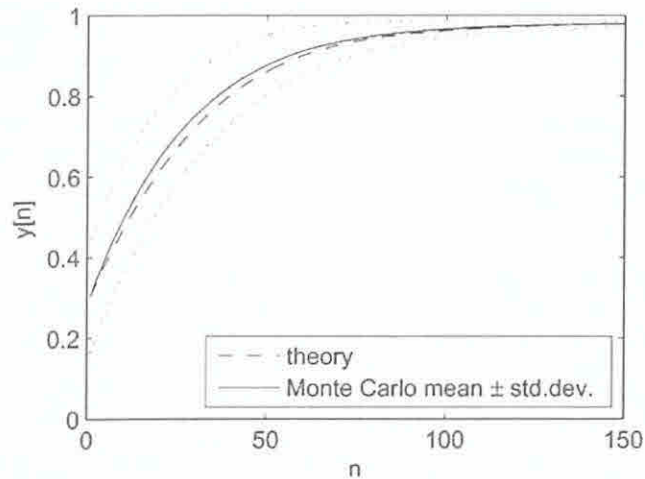
รูปที่ 2.13 ความต่างเฟสของแต่ละ โหนดหลังจากมีการปรับเฟสและส่งสัญญาณซ้ำ เมื่อมีจำนวน โหนดเท่ากับ 10 โหนด [1]

ขั้นตอนที่ 4) สถานีฐานจะป้อนกลับสัญญาณจำนวนหนึ่งบิตเพื่อที่จะบอกว่าอัตราส่วน สัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่รับมาได้ในครั้งนี้อยู่สูงกว่าหรือต่ำกว่าครั้งที่แล้ว โดยบิต 1 มีความหมาย ว่า อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่รับได้สูงกว่าครั้งที่แล้ว ขณะที่บิต 0 มีความหมายว่า อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่รับได้ต่ำกว่าครั้งที่แล้ว ถ้าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณ

รบกวนที่รับมาได้สูงกว่าเดิม กำหนดให้แต่ละ โหนดปรับค่าเฟสของการส่งครั้งล่าสุดไว้ แต่ถ้า อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่รับมาได้ต่ำกว่าเดิม ให้ โหนดกลับไปปรับค่าเฟสเดิมไว้

ขั้นตอนที่ 5) ทำวนขั้นตอนที่ 1-4 ซ้ำไปเรื่อย ๆ เพื่อหาเฟสของแต่ละ โหนดที่ให้ค่าอัตราส่วน สัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่สูงที่สุด

รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างค่าความต่างเฟสของสัญญาณของแต่ละ โหนด Φ_k หลังจากผ่าน การซิงโครไนซ์เฟสแบบวงรอบปิดโดยอาศัยการป้อนกลับสัญญาณ 1 บิต โดยกำหนดให้จำนวน โหนดทั้งหมด $K = 10$ โหนด จากรูปจะเห็นว่ายิ่งมีการวนรอบส่งสัญญาณซ้ำ ๆ มากขึ้นเท่าไร เฟส ของแต่ละ โหนดยิ่งใกล้กันเข้าไปเท่านั้น ซึ่งส่งผลให้กำลังรวมของสัญญาณเพิ่มขึ้น โดยจากตัวอย่าง จะเห็นว่าเมื่อวนรอบเป็นจำนวน 500 รอบ ความต่างเฟสของแต่ละ โหนดจะกระจายตัวอยู่ในช่วง 0° ถึง 15° ซึ่งจะได้กำลังรวมของสัญญาณหรืออัตราขยายจากการก่อรูปลำคลื่นเท่ากับ 97% เมื่อเทียบกับอัตราขยายสูงสุด โดยอัตราขยายจากการก่อรูปลำคลื่นสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.25) $E[P_R] = 1 + (K - 1)(E[\cos \phi_k])$ ที่ได้อธิบายในบทที่แล้ว ซึ่งจะเห็นว่าระบบจะได้อัตราขยาย สูงสุดเมื่อเฟสของทุก โหนดเท่ากัน โดยอัตราขยายสูงสุดที่ได้จะเท่ากับจำนวน โหนด K ถ้ากำลังส่ง



รูปที่ 2.14 จำนวนครั้งในการส่งสัญญาณซ้ำ n ครั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราขยายที่ได้จากการก่อรูปลำคลื่นเมื่อจำนวน โหนดเท่ากับ 10 โหนด [1]

สัญญาณของแต่ละ โหนดเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นในกรณีที่จำนวน โหนดเท่ากับ 10 โหนด ตามที่ยกตัวอย่างในรูปที่ 2.13 จะมีอัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 10 และ เมื่อวนรอบเป็นจำนวน 500 รอบ ความต่างเฟสของแต่ละ โหนดจะมีค่ากระจายตัวอยู่ในช่วง 0° ถึง 15° ดังนั้นเมื่อวนรอบเป็นจำนวน 500 รอบ ระบบได้อัตราขยายเท่ากับ $E[P_R] = 1 + (10 - 1)(E[\cos 15^\circ]) = 9.7$ หรือ 97% เมื่อเทียบอัตราขยายสูงสุด

โดยอัตราขยายจากการก่อรูปลำคลื่นที่ได้จากการส่งสัญญาณซ้ำจำนวน n ครั้ง ในกรณี K โหนดใด ๆ สามารถคำนวณหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

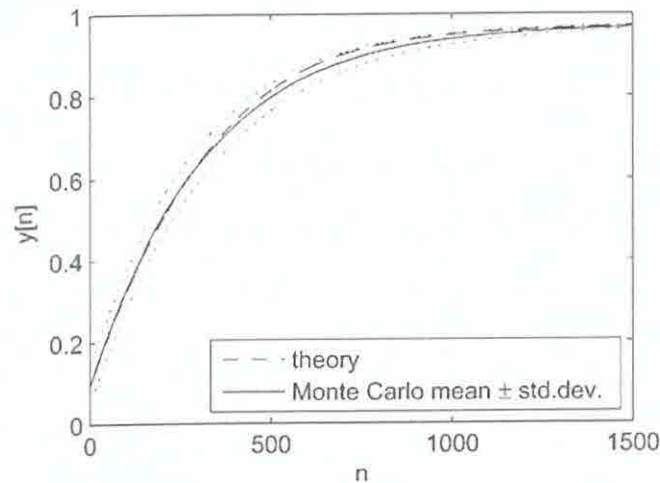
$$h_n(y) = \sigma_{\text{re}}[n] i\left(\frac{y(1-x_n)}{\sigma_{\text{re}}[n]}\right) \quad (2.45)$$

เมื่อ

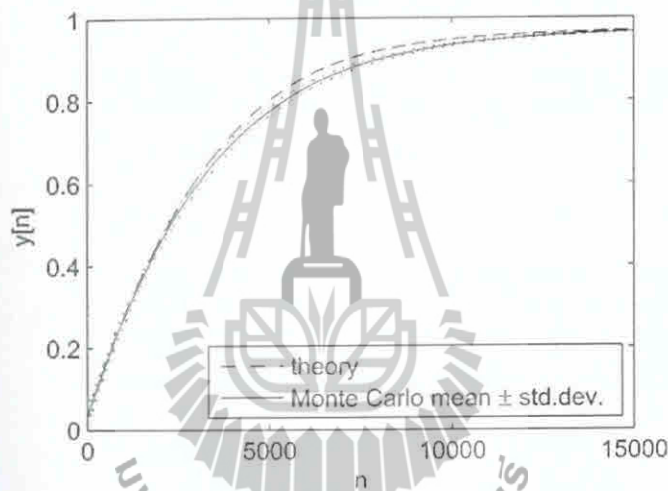
$$i(x) \square \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} - xQ(x) \quad (2.46)$$

ส่วน $Q(x)$ คือฟังก์ชันแจกแจงสะสมของการสุ่มแบบเกาส์ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จาก

$$Q(x) \square \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (2.47)$$



รูปที่ 2.15 จำนวนครั้งในการส่งสัญญาณซ้ำ n ครั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราขยายที่ได้จากการก่อรูปลำคลื่นเมื่อจำนวนโนดเท่ากับ 100 โนด [1]



รูปที่ 2.16 จำนวนครั้งในการส่งสัญญาณซ้ำ n ครั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราขยายที่ได้จากการก่อรูปลำคลื่นเมื่อจำนวนโนดเท่ากับ 1000 โนด [1]

และ $\sigma_{y_n}^2[n]$ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังของสัญญาณ Y_n ที่เกิดจากการสุ่มเฟส $\delta_{k,n}$ ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จาก

$$\sigma_{y_n}^2[n] = \frac{1}{2K^2} \sum_{k=1}^K \alpha_k^2 (1 - x_n^2 - \rho_n E_{y,n} [\cos(2\phi_i[n])]) \quad (2.48)$$

เมื่อ α_k คือการลดทอนในช่องสัญญาณ เมื่อ $x_n = E[\cos(\delta_i[n])]$ และ $\rho_n = x_n^2 - E[\cos(2\delta_i[n])]$

รูปที่ 2.14 แสดงค่าอัตราขยายที่ได้จากการก่อรูปลำคลื่น $y[n]$ เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนครั้งในการส่งสัญญาณซ้ำ n ครั้ง ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีจากสมการ (2.45) และการจำลองผลแบบ

วิธีการมอนติคาร์โล (Monte Carlo) ในกรณีที่มีจำนวนโนด $K = 10$ โนด เมื่อค่าการปรับเฟสของแต่ละโนด δ_i กระจายตัวอยู่ในช่วง -31.6° ถึง 31.6° ขณะที่เส้นจุดสองเส้นในรูป คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ $[Y_{best_n}]/K$ ตามที่นิยามในสมการ (2.43) โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะแสดงขอบเขตบนและขอบเขตล่างของค่าเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองผลแบบวิธีการมอนติคาร์โล จากรูปจะเห็นว่าแต่ละโนดจำเป็นต้องปรับเฟสและส่งสัญญาณซ้ำ ถึงจำนวน 100 รอบ จึงจะสามารถได้อัตราขยายจากการก่อรูปลำคลื่นเท่ากับ 90% เทียบกับอัตราขยายสูงสุด ขณะที่เพิ่มจำนวนโนดมากขึ้นเป็น 100 โนด และ 1,000 โนดตามที่แสดงในรูปที่ 2.15 และ รูปที่ 2.16 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าในกรณี 100 โนด ต้องการส่งสัญญาณซ้ำ อย่างต่ำจำนวน 1,000 รอบ เพื่อให้ได้อัตราขยายจากการก่อรูปลำคลื่นประมาณ 90% ส่วนกรณี 1,000 โนด ต้องการส่งสัญญาณซ้ำ อย่างต่ำจำนวน 10,000 รอบเพื่อให้ได้อัตราขยายจากการก่อรูปลำคลื่นเท่ากับ 90% จะเห็นได้ว่ายิ่งจำนวนโนดเพิ่มมากขึ้นแต่ละโนดจะต้องวนรอบส่งสัญญาณซ้ำมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (2.45) ที่แปรผันตามจำนวน K โนด และจากรูปที่ 2.14 รูปที่ 2.15 และ รูปที่ 2.16 สามารถสรุปได้ว่าในกรณีที่ต้องการอัตราขยายจากการก่อรูปลำคลื่นมากกว่า 90% แต่ละ โนดต้องส่งสัญญาณซ้ำอย่างต่ำจำนวน 10 เท่าของจำนวนโนด หรือ $n \geq 10K$

2.5 กล่าวสรุป

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างการก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเองกับการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย

การก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเอง	การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจาย
- สามารถหันพู่หลักไปยังทิศทางที่ต้องการได้	- สามารถหันพู่หลักไปยังทิศทางที่ต้องการได้
- โหนดต้องติดตั้งสายอากาศแถวลำดับ	- โหนดต้องการสายอากาศเพียงต้นเดียวในการก่อรูปลำคลื่น
- ต้องการหน่วยประมวลผลสัญญาณในการก่อรูปลำคลื่น	- ต้องทำการซิงโครไนซ์เฟส

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติของการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายกับการก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเองตามที่สรุปไว้ในตารางที่ 2.1 พบว่าทั้งการก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเองและการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายมีความสามารถในการหันพู่หลักไปยังทิศทางที่ต้องการได้เช่นเดียวกัน แต่ทั้งสองระบบจะต่างกันที่การก่อรูปลำคลื่นด้วยตัวเองต้องการสายอากาศแถวลำดับที่มีจำนวนสายอากาศหลายต้นเพื่อใช้ในการก่อรูปลำคลื่น ในขณะที่การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายต้องการสายอากาศเพียงต้นเดียวต่อโหนดในการก่อรูปลำคลื่น ด้วยข้อได้เปรียบนี้การก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายจึงเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับโหนดที่มีขนาดเล็กที่สามารถเคลื่อนที่ได้ มีพลังงานจำกัดและช่วยลดค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการติดตั้งสายอากาศแถวลำดับ แต่ก็แลกมาด้วยการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายจำเป็นต้องทำการซิงโครไนซ์เฟสเพื่อก่อรูปลำคลื่น คือสัญญาณของแต่ละโหนดจะต้องไม่หักล้างกันเองเมื่อรวมสัญญาณกันที่สถานีฐาน ซึ่งการซิงโครไนซ์เฟสแบบ one-bit feedback เป็นวิธีการที่อาศัยการป้อนสัญญาณอ้างอิงไปกลับระหว่างสถานีฐานและโหนดเพื่อการซิงโครไนซ์เฟส ในกรณีที่ต้องการอัตราขยายจากการก่อรูปลำคลื่นมากกว่า 90% แต่ละโหนดต้องส่งสัญญาณซ้ำอย่างต่ำจำนวน 10 เท่าของจำนวนโหนด หรือ $n \geq 10K$

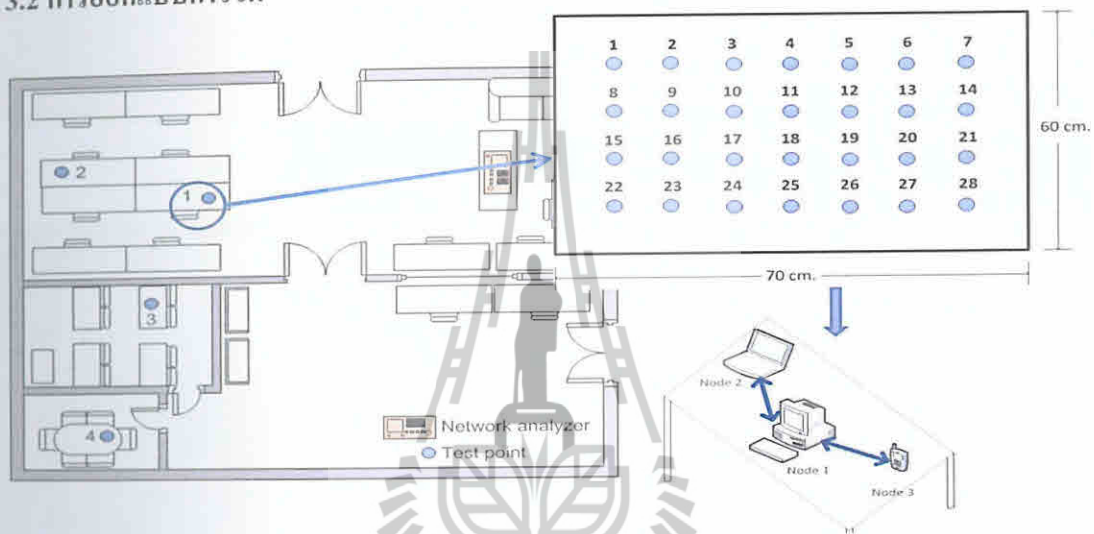
บทที่ 3

วิธีการดำเนินการทำโครงการ

3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินการของโครงการ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจถึงรูปแบบลักษณะของโครงการนี้

3.2 การออกแบบการวัด



- กำหนดพื้นที่การทดลอง คือ แลปโทรคมนาคม ที่ F4 โดยกำหนดจุดการทดลองเป็น 4 กรณี คือ
 1. LOS ใกล้เคียง
 2. LOS ไกล
 3. NON-LOS ใกล้เคียง
 4. NON-LOS ไกล

● กำหนดให้ขอบเขตการกระจายตัวของ โหนดอยู่ในพื้นที่ขนาดเล็ก ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 60x70 ซม. โดยอ้างอิงจากขนาดโต๊ะทำงาน

- กำหนดให้จำนวน โหนดที่ทดสอบเท่ากับ 28 โหนด
- กำหนดให้โหนดทั้งภาครับและภาคส่งใช้งานที่ 2.6 GHz
- โดยทำการวัดทั้งหมด 2 ครั้ง

- ครั้งที่ 1 จะทำการวัดเฟสแต่ละจุดทั้ง 28 โหนด โหนดละ 3 ค่าการทดลอง
- ครั้งที่ 2 จะทำการวัดเฟสแต่ละจุดที่ตำแหน่งโหนดกึ่งกลาง คือ โหนดที่ 11 ตำแหน่งจุดละ 100 ค่าการทดลอง

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



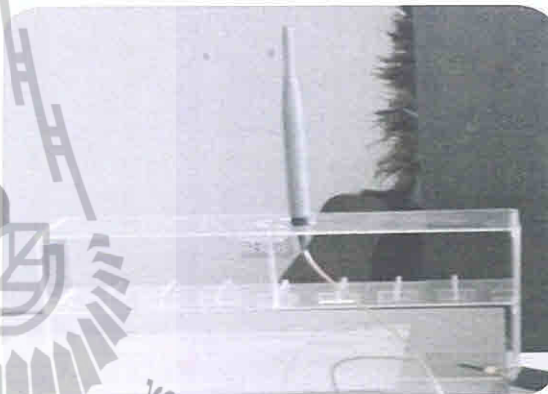
PA



LNA



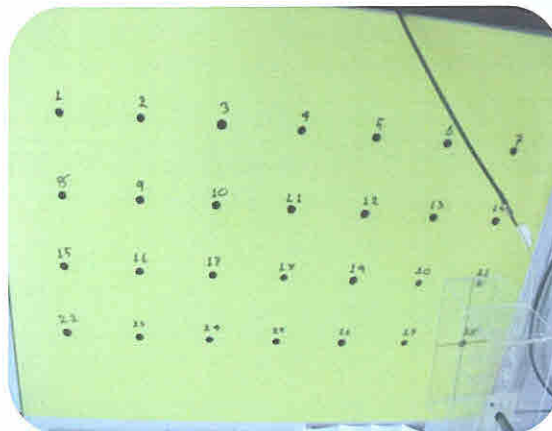
เครื่องมือวัด Network Analyzer



เสาอากาศและฐานตั้ง

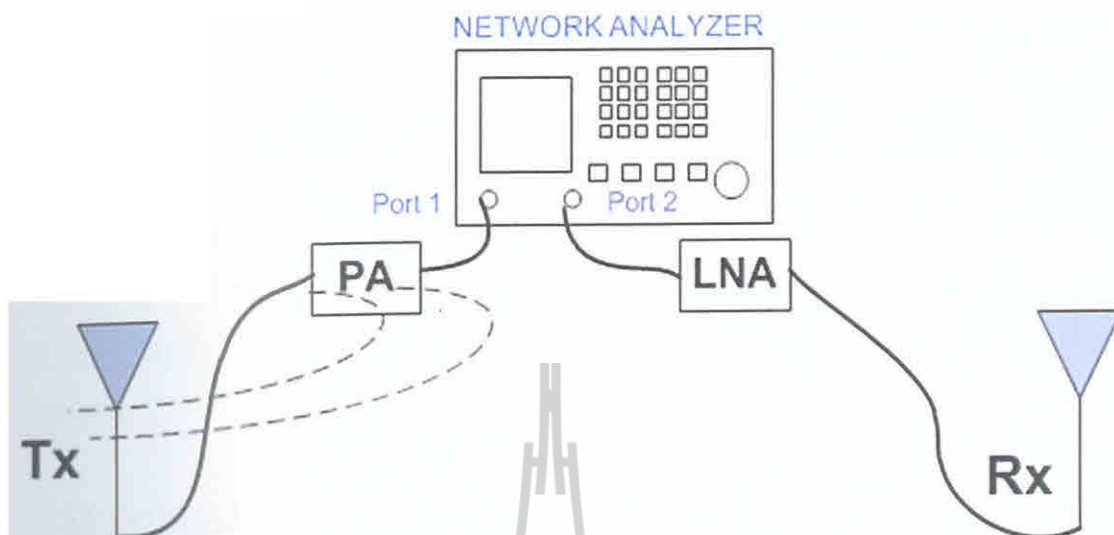


สาย CFD 200



ตำแหน่ง โหนดที่ใช้วัด

3.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์



- ภาคลัง Port 1 ต่อเข้ากับ input ของ PA และสายอากาศออกที่ output ของ PA
- ภาครับ Port 2 ต่อเข้ากับ input ของ LNA และสายอากาศออกที่ output ของ LNA

3.5 การวัด

- ทำการ calibrate สายที่ทำการวัดทั้งหมด

วิธีการ Calibrate สาย

- กดปุ่ม Manu เลือก CW FREQ ใส่ความถี่ที่ต้องการคือ 2.6 GHz
- กดปุ่ม Meas เลือก S21
- กดปุ่ม CAL เพื่อทำการ calibrate
- เลือก CAL Manu เลือก Response เลือก True
- กดปุ่ม Marker
- กดปุ่ม Avg แล้วเปลี่ยนจาก Avg off เป็น Avg on และเปลี่ยนจาก Smoothing off เป็น Smoothing on

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวัดและการวิเคราะห์ผลที่จะแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของเฟสในพื้นที่ขนาดเล็ก และผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบ

4.2 ผลการวัดครั้งที่ 1

ผลการวัดเฟส

Location 1: Near LOS

Note: unit is degree

Time 1

Row/ Column	1	2	3	4	5	6	7
1	26.9	27.1	18.9	23.1	31.2	19.8	42.5
2	37.5	29.1	4.5	27.3	43.1	23.8	20.1
3	35.4	11.9	4.6	60.5	47.8	10.2	30.7
4	46.5	26.8	28.7	30.8	24.1	45.6	18.2

Mean = 26.3°

Time 2

Row/ Column	1	2	3	4	5	6	7
1	32.3	30.3	25.6	29.8	32	20.5	39.5
2	34.2	21.4	4.9	23.8	35.8	25.7	28.3
3	30.3	5	-7.4	36.6	43.2	2.9	28.2
4	53.1	29.5	21.2	-15.7	21.6	44.5	16.5

Mean = 24.8°

Time 3

Row/ Column	1	2	3	4	5	6	7
1	36.1	29.8	18.5	22.7	30.4	23.1	36.2
2	40.1	20	6.4	27.9	28.8	19.2	27.6
3	28.7	7.9	6.8	18.6	41.6	16.8	26.9
4	50.2	30.2	21.3	-8.3	4.3	36.9	19

Mean = 23.8°

Location 2: Far LOS

Note: unit is degree

Time 1

Row/ Column	1	2	3	4	5	6	7
1	12.6	28.5	45.6	38.1	26	2.9	25.1
2	22.5	6.9	13.7	17.5	-1.1	14.2	38.2
3	19.6	10.4	23.9	76.5	31.3	53.2	15.8
4	21.3	21.3	34.8	15.3	7.1	49.2	46.7

Mean = 25.6°

Time 2

Row/ Column	1	2	3	4	5	6	7
1	4.5	20.6	36.6	10.5	30.3	-4.7	22.8
2	33.1	19.2	12.6	26.1	2.3	11.2	33.6
3	29.6	15	29.4	66.2	29.2	40.9	57.4
4	19.8	13.5	38.2	25.8	3	51.2	56.2

Mean = 26.2°

Time 3

Row/ Column	1	2	3	4	5	6	7
1	10.2	22.8	39.4	10.3	23.9	1.8	16.8
2	32.2	38.1	20.9	21.5	5.7	23.7	43.6
3	37.9	25.8	31.8	60.9	33.6	18.8	50.7
4	7.9	14.1	38.6	26.8	13.5	49.6	48.7

Mean = 27.5°

Location 3: Near NLOS

Note: unit is degree

Time 1

Row/ Column	1	2	3	4	5	6	7
1	10	12.5	7.2	13.8	35.7	15.8	4.7
2	24.3	7.9	15.8	18.5	14.8	4.9	-2.2
3	-1.9	12	9.8	22.3	31.5	-3.6	11.8
4	23.8	28.9	15.7	37.6	4.2	15.1	5.4

Mean = 14.5°

Time 2

Row/ Column	1	2	3	4	5	6	7
1	12.2	20.4	10.9	15.9	46.9	22.4	2.8
2	22.5	6.5	11.7	22.8	16.9	6.6	2.4
3	7.6	4.8	15.3	26.4	36.6	5.5	12.9
4	24.5	21.7	30.9	33.5	13.2	22.9	1.8

Mean = 17.1°

Time 3

Row/ Column	1	2	3	4	5	6	7
1	13.8	9.8	8.7	3.4	40.2	17.7	5.1
2	17.9	7.5	5.2	14.1	13.3	6.2	-2.4
3	10.2	7.9	14.7	20.1	40.9	2.8	13.5
4	23.8	19.2	35.7	30.5	24.1	24.2	-1.2

Mean = 15.2°

Location 4: Far NLOS

Note: unit is degree

Time 1

Row/ Column	1	2	3	4	5	6	7
1	7.4	38.6	22.5	23.2	5.6	19.7	16.4
2	15.5	2.3	21.7	31.9	2.5	11.9	29.5
3	8.5	-17.5	14.9	9.8	7.1	-2.3	24.3
4	22.3	2	3.2	-2.7	20	12.6	28.1

Mean = 13.5°

Time 2

Row/ Column	1	2	3	4	5	6	7
1	21.7	40.9	14	21.5	14.6	24.8	12.6
2	20	-4.5	35.1	35.9	-6.7	16.8	34.8
3	7.6	-17.3	12.8	23.6	9.7	-6.6	29.1
4	18.9	8.2	3.6	7.5	-9.8	16.7	5.9

Mean = 14°

Time 3

Row/ Column	1	2	3	4	5	6	7
1	5.8	39.6	27.4	18.7	7.1	22.3	20.3
2	8.9	4.8	35.1	41.2	4.7	8.7	27.7
3	19.2	-9.8	18.7	4.5	3	3.4	34.3
4	23.8	1.7	7.8	6.4	17.4	19.2	23.8

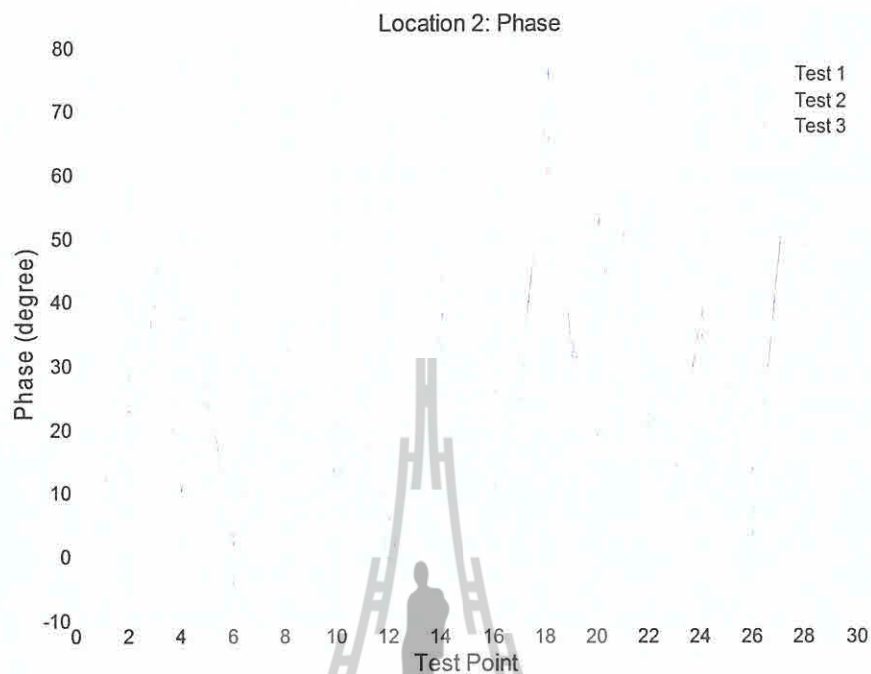
Mean = 15.9°

Location 1: Near LOS



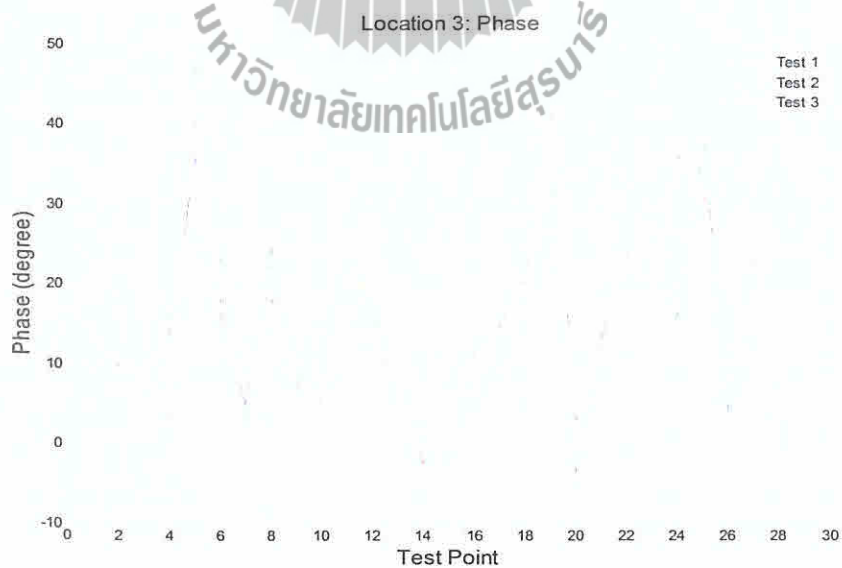
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลการวัดเฟสทั้ง 28 โหนด 3 ค่าการทดลองที่ตำแหน่ง Location 1

Location 2: Far LOS



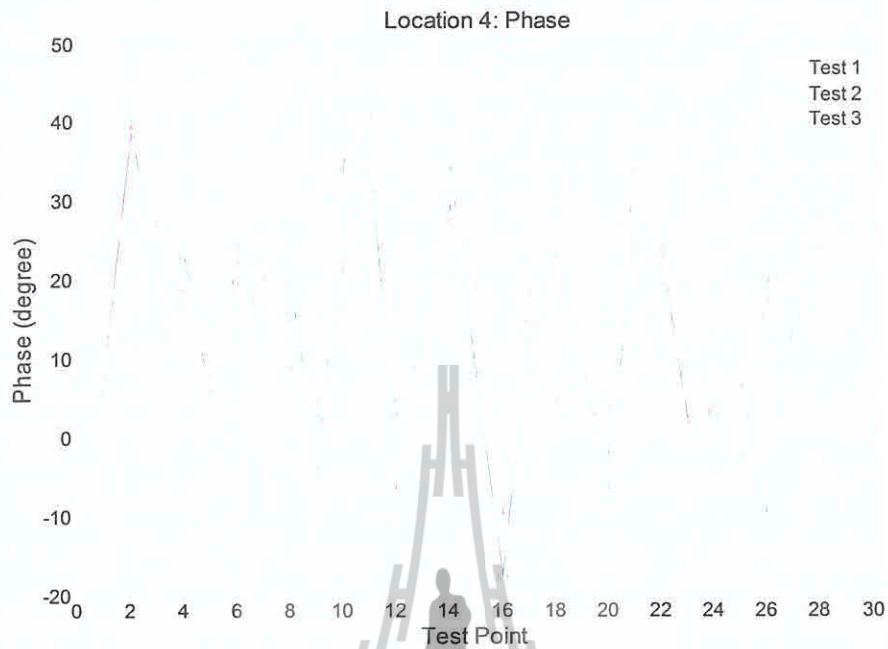
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการวัดเฟสทั้ง 28 โหนด 3 ค่าการทดลองที่ตำแหน่ง Location 2

Location 3: Near NLOS



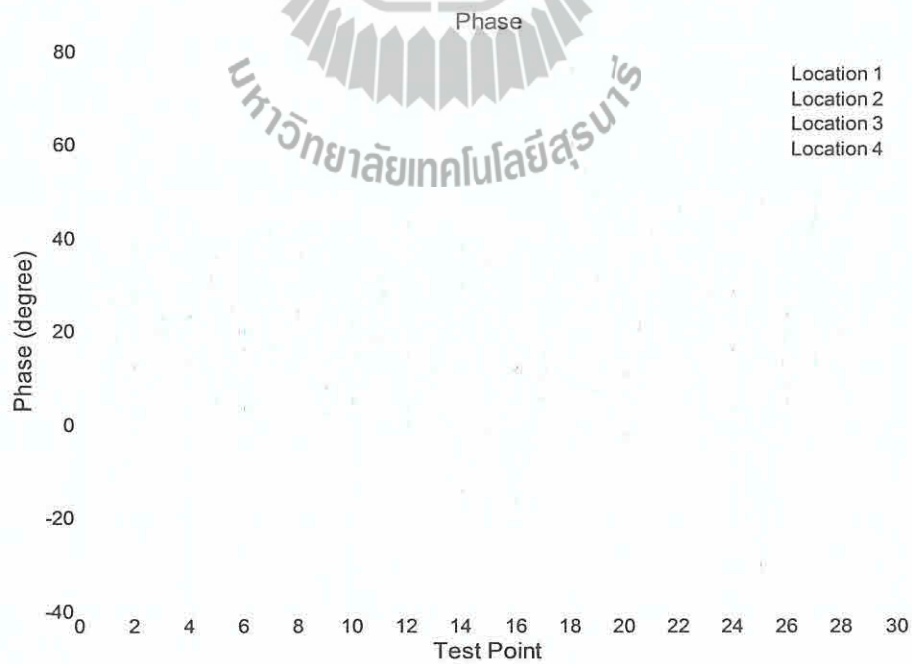
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการวัดเฟสทั้ง 28 โหนด 3 ค่าการทดลองที่ตำแหน่ง Location 3

Location 4: Far NLOS



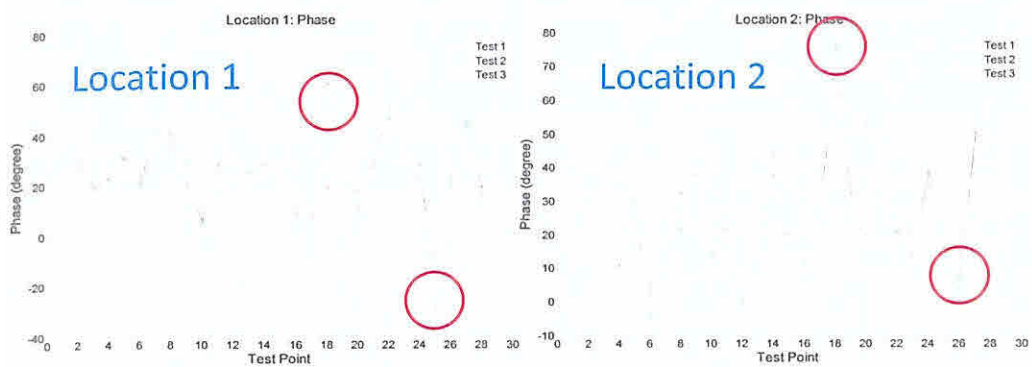
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการวัดเฟสทั้ง 28 โหนด 3 ค่าการทดลองที่ตำแหน่ง Location 4

Phase: Comparison of 4 locations



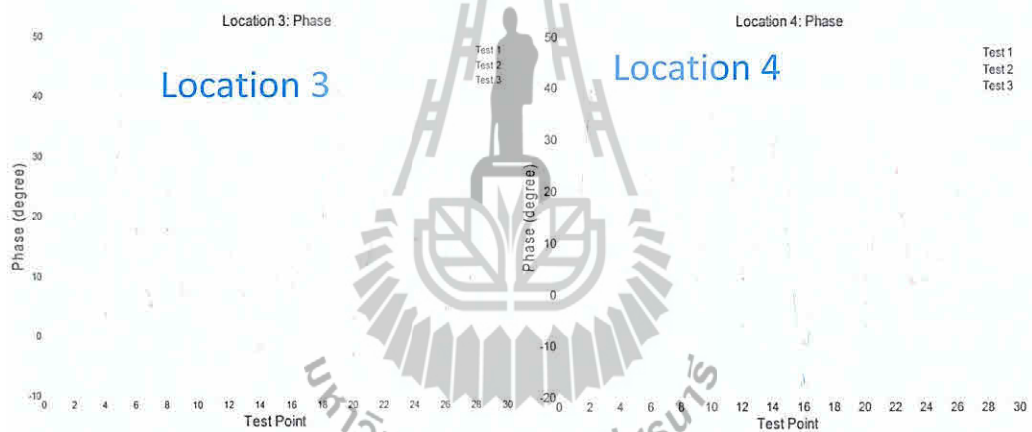
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการวัดเฟส ทั้ง 4 Locations

1) LOS case



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการกระจายตัวของเฟส ในกรณี LOS

2) NLOS case



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการกระจายตัวของเฟส ในกรณี NLOS

3) Average phase

Average Phase of all test point

		Time 1	Time 2	Time 3
LOS	Location 1 near LOS	26.3°	24.8°	23.8°
	Location 2 far LOS	25.6°	26.2°	27.5°
NLOS	Location 3 near NLOS	14.5°	17.1°	15.2°
	Location 4 far LOS	13.5°	14°	15.9°

จากผลการทดลองการวัดการกระจายตัวของเฟสทั้ง 4 location ค่าการทดลอง พบว่า ค่าเฟสมีการเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่ง location คือ ในกรณี near LOS ค่าเฟสเท่ากับ 26.3 °, 24.8 °, 23.8 ° ในกรณี far LOS ค่าเฟสเท่ากับ 25.6 °, 26.2 °, 27.5 ° ในกรณี near NLOS ค่าเฟสเท่ากับ 14.5 °, 17.1 °, 15.2 ° และในกรณี far NLOS ค่าเฟสเท่ากับ 13.5 °, 14 °, 15.9° ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองครั้งนี้ยังไม่เกิดผลกระทบอะไรขึ้นจึงต้องทำการวัดค่าเฟสเพิ่มเป็น location ละ 100 ค่าการทดลอง วัดเฉพาะที่ตำแหน่งโนดที่ 11



4.3 ผลการวัดครั้งที่ 2

ตารางผลการวัดค่าเฟส ที่ตำแหน่งโนดที่ 11 จำนวน 100 ค่าการทดลอง

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดค่าเฟสที่ Location 1

Location 1 (point 11)							
Time	Phase	Time	Phase	Time	Phase	Time	Phase
1	45.1	26	53	51	49.2	76	49.5
2	51.6	27	54.6	52	52.9	77	53.2
3	56.1	28	51.2	53	50	78	53.5
4	22.3	29	57.4	54	51.2	79	51.5
5	14.6	30	58.2	55	50.3	80	53.6
6	38.9	31	58.5	56	49.2	81	55.5
7	45.2	32	57.4	57	48.6	82	54.3
8	45.1	33	57.8	58	48.1	83	52.1
9	46.3	34	54	59	47.8	84	53.5
10	46.6	35	55.4	60	48.4	85	54
11	45.1	36	55.8	61	50.7	86	55.6
12	47.7	37	54.1	62	49.3	87	54.6
13	51.5	38	53.4	63	48.8	88	46.9
14	52.7	39	53.9	64	49.6	89	52.5
15	53.3	40	51.5	65	50.1	90	53.2
16	54.1	41	54.3	66	50.4	91	53.4
17	53.7	42	53.3	67	49.5	92	52.6
18	53.1	43	52.6	68	48.8	93	53.5
19	54.4	44	53.6	69	49.1	94	53.7
20	54.8	45	52.7	70	51.2	95	54.2
21	56.7	46	52.4	71	50.2	96	53.8
22	56.2	47	47.6	72	49.9	97	54.5
23	55.5	48	48.5	73	49.4	98	54.2
24	54.7	49	48.1	74	50.3	99	53.6
25	52.6	50	50.9	75	49.2	100	54.7

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวัดค่าเฟสที่ Location 2

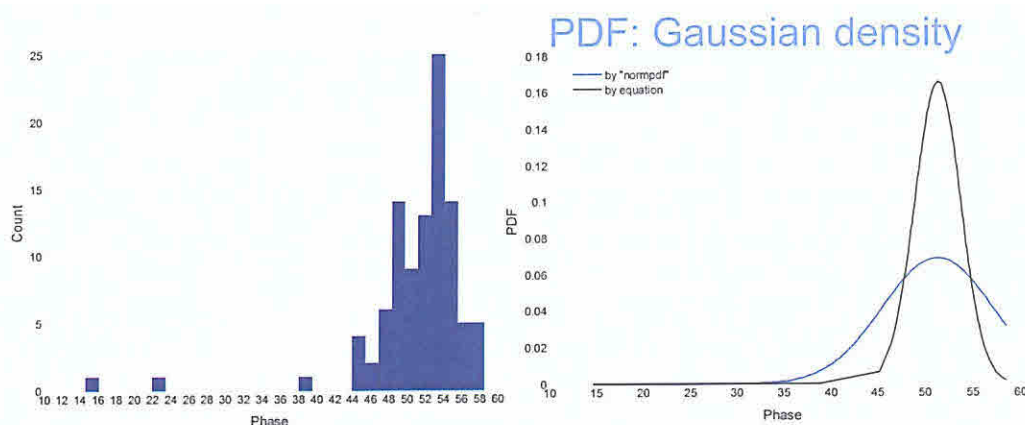
Location 2 (point 11)							
Time	Phase	Time	Phase	Time	Phase	Time	Phase
1	14.9	26	16.3	51	9.9	76	15.5
2	15.4	27	17.1	52	9.2	77	16.8
3	18.6	28	11.2	53	8.5	78	17.4
4	16.8	29	14.3	54	9.1	79	17.9
5	17.3	30	10.7	55	10.9	80	17.2
6	16.6	31	12.9	56	11.8	81	16.6
7	16.4	32	12.3	57	12.6	82	17.8
8	16.5	33	11.9	58	13.9	83	17.3
9	17.5	34	11.7	59	14.4	84	17.2
10	18.3	35	9.8	60	14.6	85	17.7
11	19.9	36	13.9	61	14.4	86	18.1
12	19.3	37	12.5	62	13.9	87	15.8
13	18.9	38	12.9	63	15.8	88	16.4
14	19.5	39	13.4	64	13.7	89	17.2
15	17.2	40	14.2	65	11.1	90	15.6
16	17.5	41	13.6	66	11.7	91	16.2
17	17.6	42	13.9	67	12.1	92	15.8
18	18.2	43	11.7	68	12.9	93	14.3
19	18.3	44	11.9	69	13.1	94	17.5
20	17.5	45	12.7	70	14.2	95	17.7
21	16.4	46	12.3	71	15.3	96	16.1
22	18.6	47	9.9	72	16.5	97	17.6
23	15.2	48	8.5	73	17.5	98	16.8
24	17.2	49	9.1	74	16.6	99	17.1
25	17.7	50	7.3	75	16.2	100	17.7

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวัดค่าเฟสที่ Location 3

Location 3 (point 11)							
Time	Phase	Time	Phase	Time	Phase	Time	Phase
1	110.4	26	91.2	51	77.1	76	78.8
2	126.8	27	87.4	52	78.4	77	83.8
3	121.7	28	80.2	53	77.9	78	85.4
4	124.3	29	82.8	54	80.2	79	87
5	118.5	30	81.4	55	76.4	80	88.6
6	122.8	31	79.5	56	74.6	81	87.3
7	110.5	32	81.9	57	75.7	82	85.1
8	116.9	33	87.7	58	82.7	83	87.5
9	120.2	34	90.4	59	83.2	84	82.9
10	122.7	35	83.1	60	86.9	85	84.8
11	120.8	36	89.3	61	87.8	86	82.2
12	124.3	37	91.5	62	87	87	76.6
13	120.6	38	93.8	63	84.3	88	81.3
14	115.2	39	92.7	64	85.6	89	82.2
15	77.9	40	92.3	65	82.2	90	77.2
16	80.4	41	90.4	66	84.6	91	80.3
17	110.5	42	91.3	67	83	92	82.7
18	90.2	43	90.6	68	82.2	93	82.8
19	87.4	44	91.1	69	80.2	94	79.2
20	88.2	45	90.6	70	81.6	95	90.5
21	90.2	46	86.6	71	81.6	96	70.1
22	96.7	47	83.6	72	82.6	97	74.6
23	90.4	48	75.4	73	81.2	98	78.5
24	83.2	49	76.7	74	81.5	99	72.3
25	83.1	50	76.2	75	83.7	100	73.5

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวัดค่าเฟสที่ Location 4

Location 4 (point 11)							
Time	Phase	Time	Phase	Time	Phase	Time	Phase
1	-137.7	26	-135.7	51	-142.4	76	-136.5
2	-137.4	27	-142.8	52	-141.3	77	-142.6
3	-133.1	28	-144.6	53	-141.8	78	-141.5
4	-135.2	29	-143.8	54	-141.6	79	-141.3
5	-135.3	30	-143.5	55	-142.6	80	-140.7
6	-136.3	31	-142.2	56	-141.9	81	-138.6
7	-131.3	32	-142.6	57	-140.3	82	-139
8	-130.1	33	-140.8	58	-140.5	83	-135.4
9	-131.7	34	-139.7	59	-139.2	84	-135.3
10	-133.3	35	-140.8	60	-137.6	85	-134.1
11	-131.5	36	-141.4	61	-138.5	86	-130.3
12	-132.8	37	-138.2	62	-140.5	87	-131.2
13	-136.8	38	-138.9	63	-138.8	88	-133.4
14	-138.2	39	-139.4	64	-138.5	89	-132.2
15	-139.9	40	-140.2	65	-139.4	90	-127.6
16	-140.1	41	-141.2	66	-137.4	91	-133.2
17	-139.8	42	-139.2	67	-137.9	92	-132.9
18	-137.3	43	-137.7	68	-139.1	93	-131.4
19	-139.5	44	-139.3	69	-140.2	94	-130.7
20	-138.4	45	-138.7	70	-140.7	95	-132.3
21	-137.3	46	-141.2	71	-141.5	96	-132.4
22	-137.8	47	-140.3	72	-139.6	97	-130.8
23	-136.6	48	-139.8	73	-138.4	98	-132.8
24	-137.2	49	-140.2	74	-139.5	99	-131.4
25	-136.8	50	-141.2	75	-140.1	100	-130.6



Mean = 51.2°
Standard deviation = 5.8°

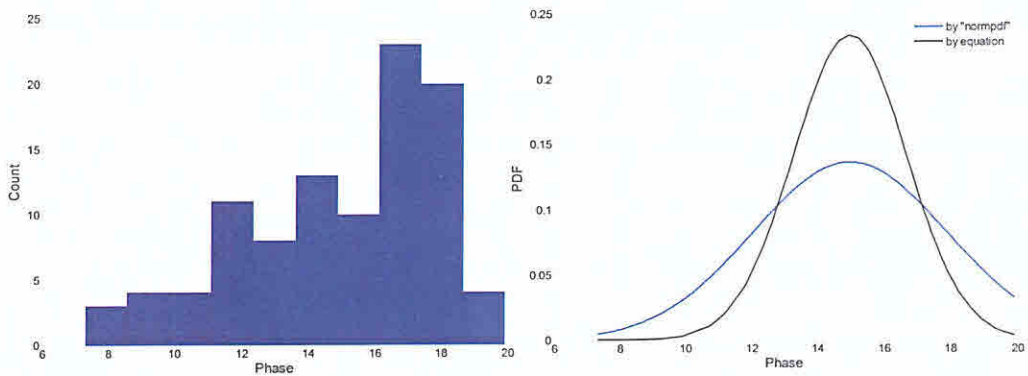
Gaussian density is defined as

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad -\infty \leq x \leq \infty$$

จากกราฟซ้ายมือเป็น Histogram หรือกราฟแจกแจงความถี่ของจำนวนครั้งของเฟสที่เกิดขึ้น โดยแกน x เป็นค่าเฟส และแกน y เป็น จำนวนค่าความถี่หรือจำนวนครั้งของค่าเฟสใดๆ ตามแกน x กราฟนี้จะบอกการ กระจายตัวของค่าเฟส ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) โดยรูปแบบการกระจายตัวยังบอกถึง รูปแบบการกระจายตัว หรือความหนาแน่นที่จะนำมาหา phase variation model ตามกราฟทางขวามือ

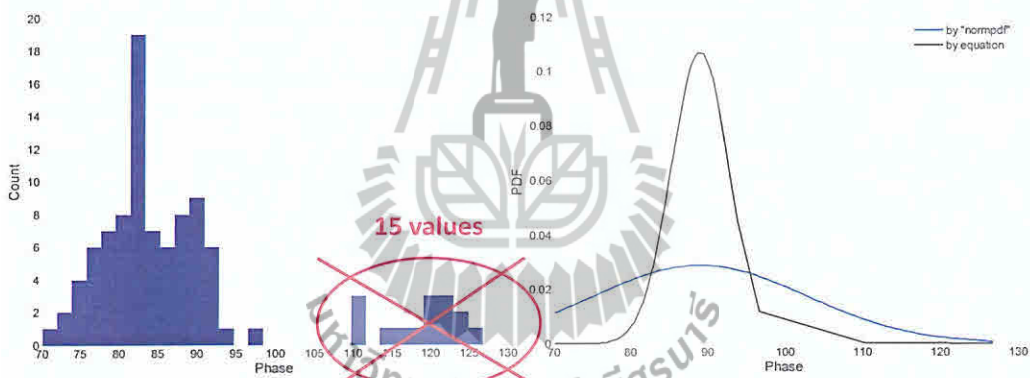
ส่วนกราฟทางขวาคือ probability density function (pdf) แบบ gaussian ที่เขียนตามสมการด้านล่าง ที่เลือกใช้ Gaussian เพราะมีลักษณะการกระจายตัวใกล้เคียงกับกราฟทางขวาที่สุด ส่วนเส้นสีดำได้จากการคำนวณตามสมการโดยตรง ส่วนกราฟสีฟ้าได้จากฟังก์ชัน matlab “normpdf” ผลที่ต่างกันเนื่องจาก “normpdf” มีการนำเอา likelihood มาหาค่า x จะเห็นว่าเส้นสีดำดูใกล้เคียงกว่า ดังนั้นจึงเลือก phase variation model ตามสมการด้านล่าง

Location 2: far LOS



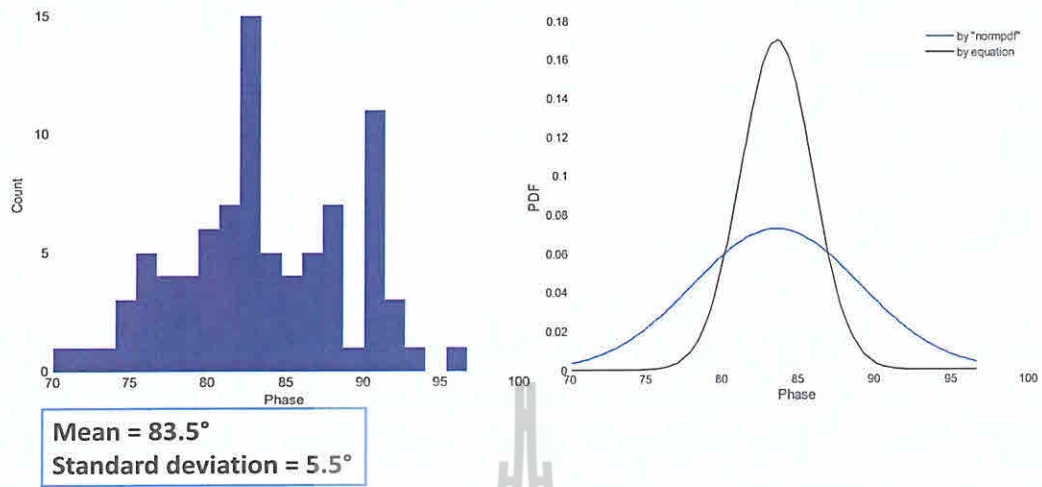
Mean = 14.9°
Standard deviation = 2.9°

Location 3: near NLOS

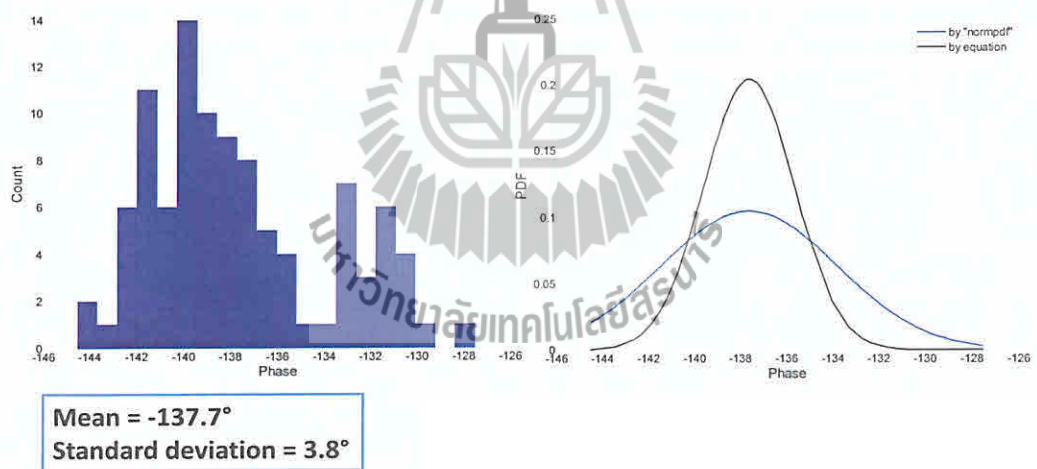


Mean = 88.9°
Standard deviation = 13.9°

Location 3: near NLOS (group of main distribution)



Location 4: far NLOS



ตารางแสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

		Mean	STD
LOS	Location 1 near LOS	51.2°	5.8°
	Location 2 far LOS	14.9°	2.9°
NLOS	Location 3 near NLOS	88.9°	13.9°
	Location 3 near NLOS (group only larg dist.)	83.5°	5.5°
	Location 4 far LOS	-137.7	3.8°

จากผลการทดลองการวัดการกระจายตัวของเฟส ทั้ง 4 location พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละ Location น้อยมาก คือ location1 near LOS ค่า Std เท่ากับ 5.8° Location2 far LOS ค่า Std เท่ากับ 2.9° location3 near NLOS ค่า Std เท่ากับ 5.5° และ Location1 far NLOS ค่า Std เท่ากับ 3.8° ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก

Location 1: near LOS

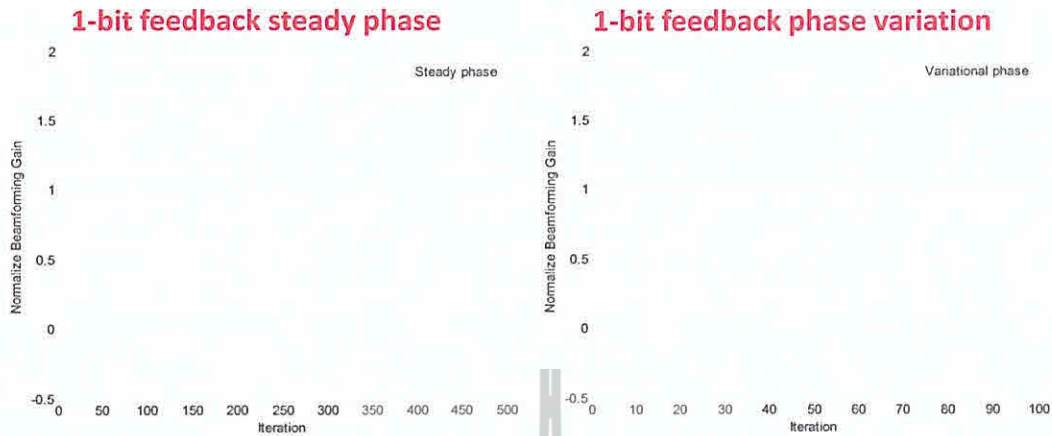
Mean = 51.2°, Standard deviation = 5.8°



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงอัตราขยายของวิธี 1-bit feedback แกน y เป็นอัตราขยายโดยค่าสูงสุด = 1 แกน x เป็น จำนวนรอบการส่งซ้ำตามวิธีการของ 1-bit feedback กราฟทางซ้ายเป็นกรณีที่เฟสคงที่ทุกรอบการส่งซ้ำ กราฟทางขวาทุกรอบการส่งซ้ำเฟสเปลี่ยนไปตาม phase variation model ที่เราวัดได้ จะเห็นว่าทั้งสองกรณีมีค่าเทียบเท่าอัตราขยายสูงสุด เพราะค่า std มีขนาดเล็กมากคือเท่ากับ 5.8 degree ส่งผลให้สัญญาณไม่ต่างกัน

Location 2: far LOS

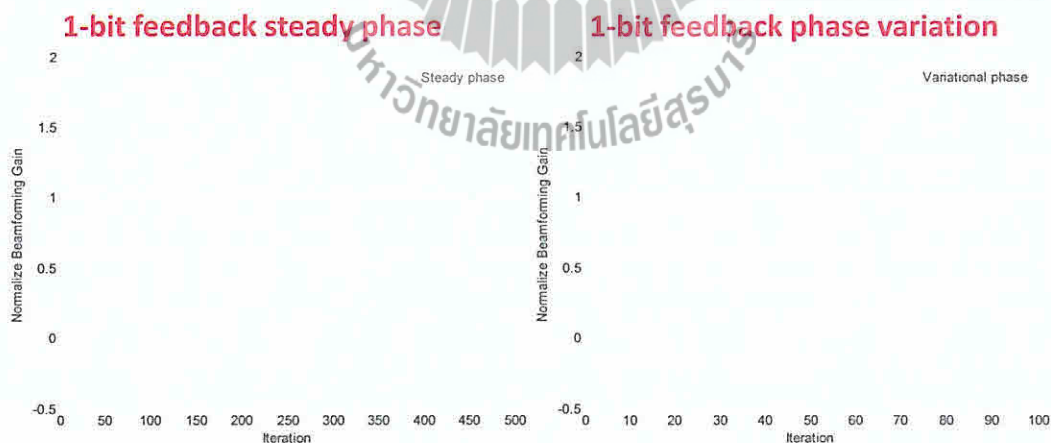
Mean = 14.9° , Standard deviation = 2.9°



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงอัตราขยายของวิธี 1-bit feedback แกน y เป็นอัตราขยายโดยค่าสูงสุด = 1 แกน x เป็น จำนวนรอบการส่งซ้ำตามวิธีการของ 1-bit feedback กราฟทางซ้ายเป็นกรณีที่เฟสคงที่ทุกรอบการส่งซ้ำ กราฟทางขวาทุกรอบการส่งซ้ำเฟสเปลี่ยนไปตาม phase variation model ที่เราวัดได้ จะเห็นว่าทั้งสองกรณีมีค่าเทียบเท่าอัตราขยายสูงสุด เพราะค่า std มีขนาดเล็กมากคือเท่ากับ 2.9 degree ส่งผลให้สัญญาณไม่ต่างกัน

Location 3: near NLOS

Mean = 83.5° , Standard deviation = 5.5°

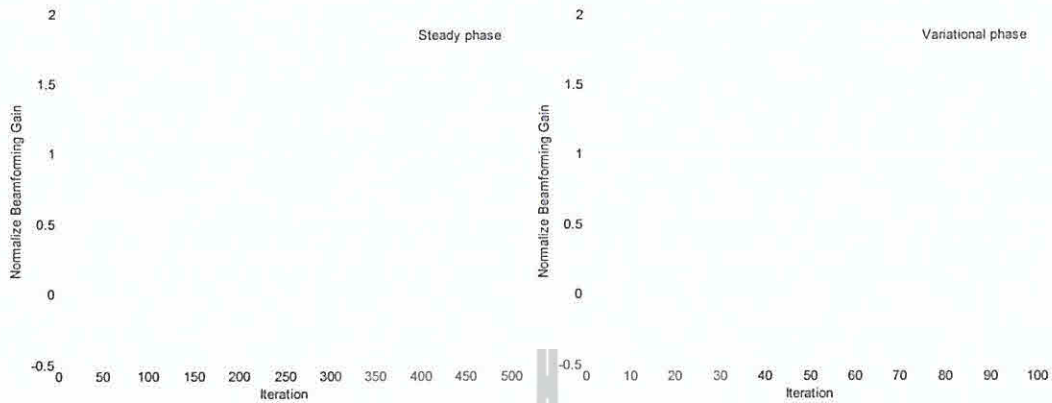


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงอัตราขยายของวิธี 1-bit feedback แกน y เป็นอัตราขยายโดยค่าสูงสุด = 1 แกน x เป็น จำนวนรอบการส่งซ้ำตามวิธีการของ 1-bit feedback กราฟทางซ้ายเป็นกรณีที่เฟสคงที่ทุกรอบการส่งซ้ำ กราฟทางขวาทุกรอบการส่งซ้ำเฟสเปลี่ยนไปตาม phase variation model ที่เราวัดได้ จะเห็นว่าทั้งสองกรณีมีค่าเทียบเท่าอัตราขยายสูงสุด เพราะค่า std มีขนาดเล็กมากคือเท่ากับ 5.5 degree ส่งผลให้สัญญาณไม่ต่างกัน

Location 4: far NLOS 1-bit feedback steady phase

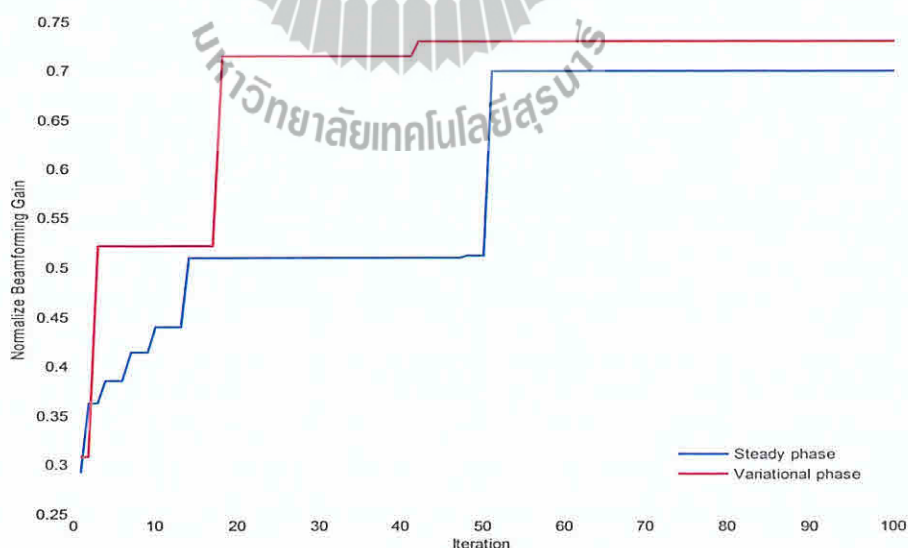
Mean = -137.7° , Standard deviation = 3.8°

1-bit feedback phase variation

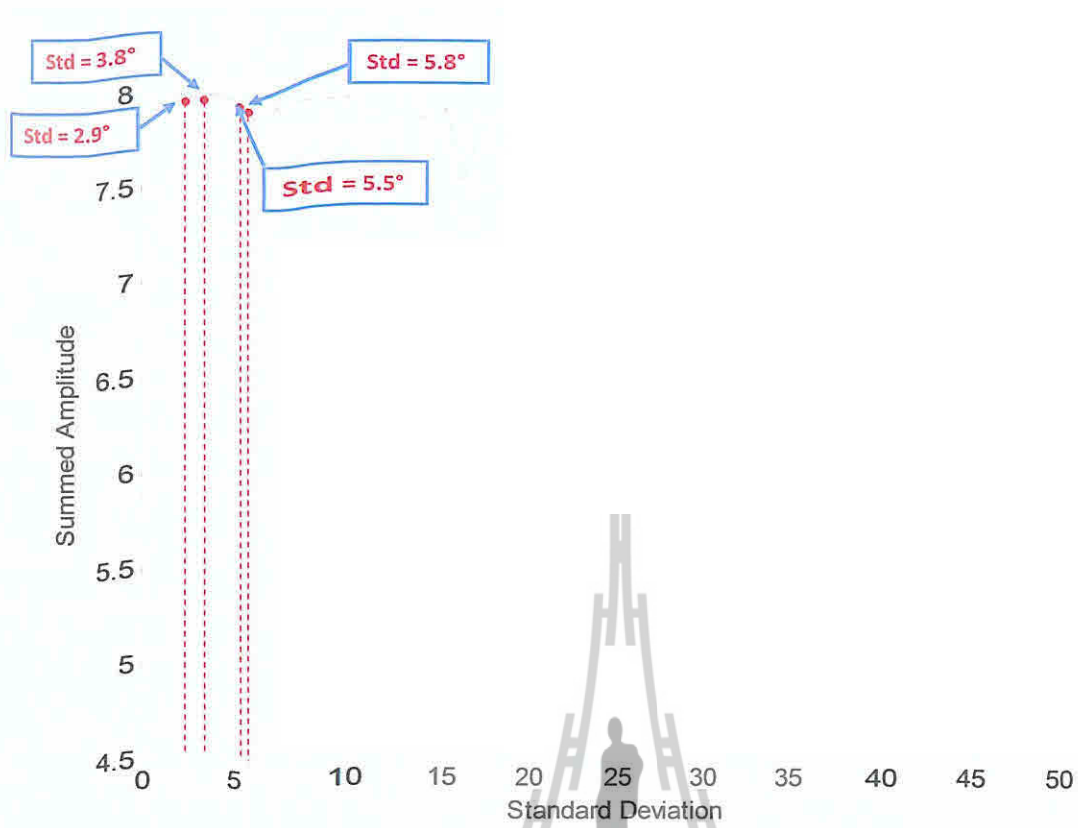


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงอัตราขยายของวิธี 1-bit feedback แกน y เป็นอัตราขยายโดยค่าสูงสุด = 1 แกน x เป็น จำนวนรอบการส่งซ้ำตามวิธีการของ 1-bit feedback กราฟทางซ้ายเป็นกรณีที่เฟสคงที่ทุกรอบการส่งซ้ำ กราฟทางขวาทุกรอบการส่งซ้ำเฟสเปลี่ยนไปตาม phase variation model ที่เรารู้ได้ จะเห็นว่าทั้งสองกรณีมีค่าเทียบเท่าอัตราขยายสูงสุด เพราะค่า std มีขนาดเล็กมากคือเท่ากับ 3.8 degree ส่งผลให้สัญญาณไม่ต่างกัน

Mean = 26.3° , Standard deviation = 100°



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงอัตราขยายที่เพิ่มค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานให้มากขึ้น คือ 100° ซึ่งพบว่าจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่า ถ้าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

จากผลการทดลองของการวัดการกระจายตัวของเฟสในพื้นที่ขนาดเล็กพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งของแต่ละ Location คือ ค่าเฟสใน Location ที่ 1 เท่ากับ 51.2° , Location ที่ 2 เท่ากับ 14.9° , Location ที่ 3 เท่ากับ 83.5° และ Location ที่ 4 เท่ากับ -137.7°

ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ 1-bit feedback ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าน้อยมาก คือ ใน Location ที่ 1, 2, 3 และ 4 เท่ากับ 5.8° , 2.9° , 5.5° และ 3.8° ตามลำดับ ดังนั้นสามารถที่จะนำกระบวนการนี้ไปใช้ในพื้นที่ขนาดเล็กนี้ได้ต่อไป

5.2 สิ่งที่ได้จากการศึกษาโครงการ

1. ได้ข้อมูลการกระจายตัวของเฟส ซึ่งได้นำไปวิเคราะห์ผลกระทบของการก่อรูปลำคลื่นแบบกระจายได้
2. ได้เรียนรู้การใช้เครื่องมือวัด Network Analyzer ได้ถูกต้อง

5.3 ปัญหาและอุปสรรค

1. ขาดความชำนาญในการใช้เครื่องมือวัด Network Analyzer
2. สภาพแวดล้อมในการวัด เช่น แอร์ทำให้การวัดค่าเฟสไม่นิ่ง

5.4 ข้อจำกัดของโครงการ

ต้องทำการทดลองในเวลากลางคืน เพราะเป็นเวลาที่สัญญาณรบกวนน้อยที่สุด

5.5 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดลองควรศึกษาความเข้าใจเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองก่อน
2. ผลการทดลองการกระจายตัวของเฟสสามารถที่จะนำไปวิเคราะห์ใช้กับกระบวนการเชิงโครโมโซมอื่นๆได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Mudumbai et al., “**Distributed Transmit Beamforming Using Feedback Control,**” *IEEE Trans. Information Theory*, Vol. 56 No. 1 Jan 2010.
- [2] R. Mudumbai et al., “**A Scalable Architecture for Distributed Transmit Beamforming with Commodity Radios: Design and Proof of Concept**” *IEEE Trans. Wireless Comm.*, Vol. 12 pp. 1418 – 1428, March 2013.
- [3] H. Xuling. “**Study on wireless local area network technology.**,” IEEE Conf. Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet) 2012, April 2012, pp. 609-612.
- [4] J. C. Liberti Jr., T. S. Rappaport (1999). **Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications**, Printice Hall PTR, NJ, 1999.
- [5] C. A. Balanis (1997). **Antenna Theory: Analysis and Design 2nd edition**. John Wiley & Sons, Inc. 1997.
- [6] B.Allen, M. Ghavami. **Adaptive Array System: Fundamentals and Applications**, John Wiley & Sons LTd, 2005.
- [7] F. Gross. **Smart Antennas for Wireless Communication**, Mc Graw Hill, 2005.
- [8] M. Rivas, “**A Review of Adaptive Beamforming Techniques for Wideband Smart Antennas**” IEEE WiCOM 2010, pp. 1-5, 23-25 Sept. 2010.
- [9] E. Klumperink, “**Beamforming techniques and RF transceiver design**” IEEE ISSCC 2012, pp. 198-199, 19-23 Feb. 2012.
- [10] T.W. Nuteson, “**Smart antenna systems for wireless applications**” IEEE con. Ant. and Prop. Society International Symposium, pp. 2804-2807, 20-25 June 2004.

- [11] T. Mack, “**A digital mm-wave smart antenna receiver based on six-port technology for near range radar applications**” Microwave Conference, 2004. 34th European, pp. 1481-1484, 14 Oct. 2004.
- [12] T. K. Sarkar, M. C. Wicks, M. Salazar-Palma, and R. Bonneau, **Smart Antennas**, New York, Wiley/IEEE Press, 2003.
- [13] Y. T. Lo, “**A mathematical theory of antenna arrays with randomly spaced elements,**” IRE Trans. Antennas Propagat., vol. 12, pp. 257–268, May 1964
- [14] R. Mudumbai, D.R. Brown, U. Madhow, H.V. Poor, “**Distributed transmit beamforming: challenges and recent progress,**” IEEE Comm. Mag., Vol. 47, issue 2, pp. 102-110, Feb. 2009.

